

Aude LAGIER

**MODIFICATIONS POSTURALES  
CONTEMPORAINES DE L'EFFORT VOCAL**

Sous la direction du Professeur A GIOVANNI

Mémoire pour l'obtention du Master 2 « Sciences du langage », parcours  
pathologie, Université de Provence, Aix-Marseille I

Année 2007-2008

# Sommaire

<b>Introduction.....</b>	<b>1</b>
<b>Première Partie : Cadre théorique.....</b>	<b>3</b>
Chapitre 1 : terminologie, définitions.....	3
1 Définition d'un comportement.....	3
2 Définition de la posture.....	3
3 Définition du forçage vocal.....	4
3.1 L'effort vocal.....	5
3.2 La fatigue vocale.....	5
3.3 Le forçage vocal.....	6
4 La théorie de F Le Huche.....	7
Chapitre 2 : Physiologie de l'effort vocal.....	9
1 Les différents niveaux d'étude.....	9
1.1 L'effort vocal au niveau laryngé.....	9
1.2 Le forçage vocal et l'ensemble du système phonatoire	10
1.3 Le forçage vocal et l'ensemble du corps.....	11
2 Modélisation de l'effort vocal : la parole Lombard.....	13
2.1 Définition de l'effet Lombard.....	13
2.2 La parole Lombard est-elle un bon reflet de l'effort vocal ?	13
2.3 Caractéristiques acoustiques et physiologiques de la parole Lombard.....	14
2.3.1 Caractéristiques acoustiques habituelles de la voix	14
2.3.2 Caractéristiques spectrales de la voix.....	14
2.3.3 Caractéristiques temporelles de la production vocale	15
2.3.4 Analyse perceptive de la voix.....	15
2.3.5 Physiologie laryngée.....	15

Chapitre 3 : La posture.....	16
1 Les acteurs du contrôle postural.....	16
1.1 Les informations sensorielles.....	16
1.2 L'intégration neurophysiologique.....	16
2 Réagir ou anticiper.....	16
2.1 Les fonctions d'orientation et de stabilisation.....	16
2.2 Synergies axiales et stratégies posturales.....	17
2.3 Les ajustements posturaux anticipés.....	17
2.4 Synergies axiales lors d'une antéflexion volontaire du tronc..	18
3 Les doubles tâches.....	18
<b>Deuxième partie : Etude expérimentale.....</b>	<b>20</b>
Chapitre 1 : Matériel et méthodes.....	20
1 Sujets.....	20
2 Situations expérimentales.....	20
2.1 Tâches.....	20
2.2 Corpus.....	20
2.3 Trois conditions expérimentales .....	21
3 Enregistrement des paramètres vocaux .....	21
3.1 Instrumentation.....	21
3.2 Paramètres étudiés .....	22
4 Enregistrement des paramètres posturaux.....	23
4.1 Instrumentation.....	23
4.2 Paramètres étudiés .....	24
5 Analyses statistiques .....	27
Chapitre 2 : Résultats.....	28
1 Les données de la voix et de la parole .....	28
1.1 L'intensité vocale moyenne.....	28

1.2 La fréquence fondamentale.....	29
1.3 Le quotient de fermeture.....	32
1.4 Les données temporelles.....	33
2 Les données posturales.....	35
2.1 Les dispersions angulaires.....	35
2.2 Durée des mouvements.....	42
2.3 Etude qualitative du mouvement.....	46
2.4 Amplitude des mouvements.....	48
3 Mise en relation de la posture et de la voix.....	52
3.1 Mise en relation temporelle des données de la voix et de la posture.....	52
3.1.1 Relation entre le début de la voix et le début du mouvement.....	52
3.1.2 Relation entre la fin de la voix et la fin du mouvement.....	53
3.1.3 Rapport de durée de la voix et du mouvement .....	53
3.2 Corrélation de l'amplitude du mouvement à l'intensité moyenne.....	55
3.2.1 Corrélation de l'amplitude de mouvement du tronc....	55
3.2.2 Corrélation de l'amplitude du mouvement de la tête...	56
<b>Troisième partie : Discussion.....</b>	<b>57</b>
1 Les données de la voix et de la parole.....	57
1.1 Les données de la voix.....	57
1.2 Les données de la parole.....	58
2 Les modifications posturales au cours de l'effort vocal.....	59
2.1 Caractérisation des modifications posturales.....	59
2.2 La relation étroite entre les caractéristiques de l'énoncé et les accompagnements posturaux.....	61
2.3 Des perturbations posturales volontaires/contrôle cognitif : l'anticipation du mouvement sur la parole.....	62

2.4 Les stratégies posturales.....	64
<b>Conclusions et Perspectives.....</b>	<b>66</b>
<b>Références bibliographiques.....</b>	<b>68</b>
<b>Annexes.....</b>	<b>76</b>

## Introduction

Le travail présenté dans ce mémoire a été réalisé grâce à la collaboration du Laboratoire Parole et Langage (UMR 6057 CNRS, Aix en Provence) et du Groupe Développement et Pathologie de l'Action (UMR 6149 CNRS, Marseille).

Pour certains professionnels, la voix est un véritable outil de travail. C'est le cas notamment des enseignants bien sûr, mais aussi des commerçants, des chanteurs, des politiciens. Lorsque les conditions environnementales (bruit, expositions à des substances irritantes) ou personnelles (état de stress, contenu émotionnel du discours) sont défavorables, le maintien d'une efficacité vocale satisfaisante nécessite un effort vocal. Force est de constater que ces professionnels sont particulièrement sujets aux plaintes vocales. La dysphonie peut être liée à une lésion laryngée reconnue lors de l'examen clinique, ou bien être dysfonctionnelle lorsqu'aucune lésion n'est retrouvée et que le trouble est rapporté à un mésusage de la voix. Ce mésusage est habituellement connu sous le terme de forçage vocal. Il est important de noter que les dysphonies organiques et dysfonctionnelles ne sont pas des termes opposés : il s'agit de deux notions largement intriquées puisqu'il existe des lésions organiques provoquées par le forçage vocal (nodules, polypes des cordes vocales), et que toute lésion dite organique, congénitale ou acquise, s'accompagne d'un forçage vocal compensateur.

Afin de mieux définir l'effort vocal, il est possible de le considérer comme un véritable comportement global du sujet mis en œuvre pour maintenir une communication efficace malgré des conditions défavorables (ou ressenties comme telles), et non plus comme un mécanisme physiologique localisé à l'appareil phonatoire. Afin d'étayer cette hypothèse, **ce travail expérimental a pour but**

**d'étudier des modifications comportementales posturales observées lors d'un effort vocal. Ces modifications posturales (du sujet debout) sont sans lien physiologique évident avec la production vocale. Nous rechercherons également s'il existe des stratégies individuelles d'adaptation à l'effort vocal.**

## **Première partie : Cadre théorique**

### **Chapitre 1 : Terminologie, définitions**

#### **1 Définition d'un comportement**

La définition d'un comportement dans le « Grand dictionnaire de la psychologie » [Ed. Larousse, 1997] est « la manière d'être et d'agir des Animaux ou des Hommes, manifestations objectives de leur activité globale » ou encore « l'ensemble des réactions objectivement observables qu'un organisme généralement pourvu d'un système nerveux exécute en réponse aux stimulations du milieu, elles-mêmes objectivement observables ». Ces définitions insistent sur le caractère global du comportement et sur son caractère observable, et probablement reproductible pour être observé.

#### **2 Définition de la posture**

La posture est la position de l'ensemble du corps ou la position relative des différents segments corporels à un instant donné [André-Thomas 1940]. Le corps humain peut être modélisé comme une superposition de cinq modules : les pieds, les jambes, les cuisses, le tronc et la tête. Ces modules sont reliés entre eux par quatre articulations : les chevilles, les genoux, les hanches et le cou. La posture assume deux fonctions : la fonction anti-gravitaire et une fonction d'interface avec le monde extérieur, afin de coupler l'action et la perception. [Massion, 1994].

Chez l'Homme, la posture érigée est considérée comme la posture de référence. L'équilibre nécessite le maintien de la projection du centre de gravité au sol à l'intérieur du polygone de sustentation qui est défini par les points d'appui au



sol. Ceci est obtenu par un contrôle postural actif qui met en jeu les muscles régulant la position de chaque articulation entre modules [Massion et Viallet, 1990]. L'action de ces muscles est régulée par les réafférences sensorielles, permettant le maintien d'un segment dans une position donnée ou un rétablissement de cette position lors de déséquilibres par des réactions et des ajustements posturaux appropriés [Paillard, 1971, Gurfinkel et Shik, 1988]. C'est la fonction anti-gravitaire de la posture : le maintien de la posture de l'ensemble du corps a pour référentiel le vecteur gravitaire (référentiel géocentré).

La posture peut également avoir pour objet de maintenir un segment du corps dans une position donnée soit par rapport aux autres segments (référentiel égocentré), soit par rapport à un élément de l'extérieur (référentiel allocentré) [Paillard, 1991]. C'est la fonction d'interface avec le monde extérieur.

### **3 Définitions du forçage vocal**

Devant la difficulté d'obtenir une définition consensuelle du forçage vocal, M. Garnier [Garnier, 2007] a proposé une enquête auprès de professionnels de la voix (médecins, orthophonistes, professeurs de chant, professeurs de phonétique). Seulement 28% d'entre eux distinguent l'effort vocal du forçage vocal : « le forçage commencerait à partir du degré où le locuteur ne possède plus les ressources techniques ou physiologiques pour pouvoir résister et continuer à être efficace » ou bien « le forçage vocal commencerait à partir du moment où l'effort vocal est mal géré ou de façon inefficace par rapport aux objectifs de la phonation ».

Afin de clarifier notre propos, nous proposons de distinguer trois concepts : l'effort vocal, la fatigue vocale et le forçage vocal. Ces concepts sont définis par analogie avec la pratique sportive.

### 3.1 L'effort vocal

La notion d'effort vocal correspond à comportement vocal ayant pour but d'améliorer ponctuellement l'intelligibilité de la parole, de façon adaptée au contexte. L'effort vocal nécessite ainsi davantage d'énergie que la voix habituelle du sujet. Il peut s'agir d'un effort prolongé (« marathon »), ou d'un effort ponctuel violent (« sprint »). Selon F. Le Huche, l'effort vocal correspond aux voix projetée ou de détresse employées à bon escient (cf. infra). Les principales modifications de la voix au cours de l'effort vocal sont l'augmentation d'intensité et de fréquence fondamentale.

### 3.2 La fatigue vocale

Une phase d'échauffement est reconnue dans la première heure de l'effort vocal et est perçue par le sujet comme un phénomène positif. Pourtant, au point de vue acoustique et physiologique ces modifications sont similaires à celles de la fatigue vocale mais d'importance modérée. [Vintturi et al., 2001, Vilkmann et al., 1999].

Puis apparaît la fatigue vocale définie comme l'adaptation vocale négative qui survient en conséquence d'une utilisation prolongée de la voix. L'adaptation vocale négative est à la fois perceptive, acoustique et physiologique, et elle indique des changements non désirés et inattendus dans le statut fonctionnel du larynx [Rantala et al., 2002, Welham et Maclagan, 2003]. Des modifications anatomiques du larynx observées en vidéo-stroboscopie après un effort vocal constituent un substratum à la notion de fatigue vocale et aux perturbations acoustiques et physiologiques qui en découlent [Stemple et al., 1995, Linville, 1995, Mann et al., 1999]. (voir annexes bibliographiques 1 et 2)

Lorsqu'il existe une fatigue vocale, l'absence de repos vocal serait à l'origine du forçage vocal. L'absence de repos vocal peut être liée à une contrainte sociale ou professionnelle, expliquant la prévalence des lésions de forçage vocal dans certaines professions [Roy et al., 2005, Sodersten et al., 2002]. Cette absence de repos vocal peut aussi être en relation avec une psychologie particulière du sujet [Roy et al., 2000]

### 3.3 Le forçage vocal

L'approche médicale retenue pour ce travail perçoit le forçage vocal par ses conséquences pathologiques : « le forçage vocal est un comportement vocal susceptible d'entraîner l'apparition de lésions dites dysfonctionnelles des cordes vocales et notamment de nodules » [Giovanni et al., 2007]. C'est la notion de phonotraumatisme des cordes vocales. [Dijkers et Nikkels, 1995]

L'évaluation perceptive des voix dysphoniques qui est actuellement la technique de référence en évaluation de la voix, prend en compte le caractère forcé de celle-ci. Les critères les plus communément admis sont ceux proposés par Hirano [Hirano, 1981] : un jury d'experts doit selon cette méthode classer la voix de 0 (voix normale) à 3 (dysphonie sévère) pour les critères suivants : G (évaluation globale), R (rough : raucité de la voix), B (breathy : voix soufflée), A (asthenic : voix faible), S (strain : caractère forcé de la voix).

#### **4 La théorie de F. Le Huche**

F. Le Huche propose une approche physio-pathologique globale du forçage vocal [Le Huche, 1984]. Il distingue trois types de comportements vocaux en fonction des situations de communication auxquelles le sujet est confronté. Lorsque le sujet n'a pas une forte intention de communiquer (par exemple parler de la pluie et du beau temps), il emploie la « voix conversationnelle » qui est une voix « économique » en termes d'énergie nécessaire à sa production. S'il existe une volonté de communication à laquelle le sujet peut se préparer, il emploie la « voix projetée », où une stratégie d'optimisation de l'appareil phonatoire est mise en place pour assurer une bonne intelligibilité propre à convaincre ou à captiver son interlocuteur. Enfin, lorsque cette stratégie est mise en échec ou bien dans une situation de stress, le sujet emploiera la « voix de détresse », où les mécanismes d'optimisation sont dépassés et où apparaît une crispation des muscles respiratoires, laryngés, et de l'ensemble du corps. Le forçage vocal résulte selon Le Huche de l'usage trop prolongé et/ou inapproprié de la voix de détresse entraînant un cercle vicieux qui pérennise le forçage vocal puisque le sujet insatisfait de sa voix continue de forcer (Fig.1).

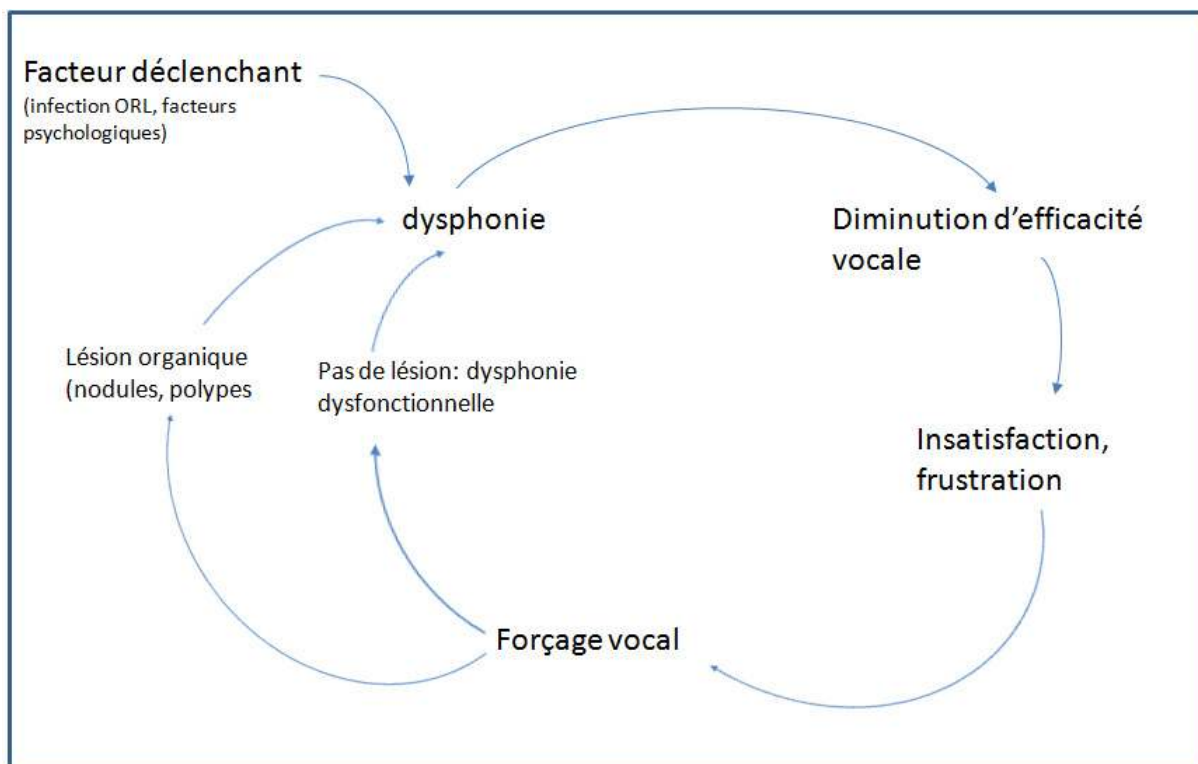


Fig.1 : Schéma du cercle vicieux du forçage vocal d'après Le Huche

Le forçage vocal résulterait donc d'une interaction entre le sujet (physiologie, psychologie), le contexte de la communication (stress, impossibilité de repos vocal lors de l'apparition des symptômes), le milieu écologique (bruit, sécheresse de l'air, tabac, mauvaises conditions posturales...), et l'auditeur.

## Chapitre 2 : Physiologie de l'effort vocal

### 1-Les différents niveaux d'étude

#### 1.1 L'effort vocal au niveau laryngé

Il s'agit sans doute du niveau physiologique le plus étudié. Les perturbations du signal acoustique et de la physiologie laryngée au cours de l'effort vocal sont l'augmentation de l'intensité et de la fréquence fondamentale (F0) de la voix, une plus grande variation de la F0 lorsque le sujet est en situation d'effort vocal (sujets dans un auditorium, mis en situation de représentation publique) [Rothman et al., 2002]. Des études ont montré au cours de l'effort vocal une augmentation du quotient fermé ou une diminution du quotient ouvert (augmentation de la durée du cycle glottique où les cordes vocales sont fermées) en électroglottographie [Huang et al., 1995] et en filtrage inverse [Sundberg et al., 2005, Stathopoulos et Sapienza, 1993, Holmberg et al. 1988], et une diminution du jitter et du shimmer (paramètres d'irrégularité d'intensité et de fréquence d'un cycle glottique à l'autre) [Huang et al., 1995]. Plusieurs mécanismes ont été proposés et seraient mis en jeu dans le système effort-fatigue-forçage vocal :

- une fatigue neuro-musculaire :en particulier la fatigue des muscles thyro-aryténoïdiens [Stemple et al., 1995],.

- une augmentation de la viscosité des cordes vocales ou étirement passif des cordes vocales [Titze, 1984],.

- une diminution de l'apport sanguin,

- une série d'ajustements compensateurs de la fatigue vocale : en voix normale, l'augmentation de la fréquence, de l'intensité, et de la durée de fermeture laryngée

au cours de l'effort vocal augmentent le travail physique du larynx (nombre de vibrations, force d'adduction, accélération des tissus). En voix forte, l'élévation de ces paramètres reflète la motivation et la mobilisation des ressources physiques restantes pour produire cette intensité, le mode « pressé » est employé. En voix de faible intensité, le seuil de pression phonatoire augmente, ce qui reflèterait un mauvais ajustement des caractéristiques visco-élastiques des cordes vocales [Vilkman et al, 1999]

Les recherches sur les conditions favorables à une bonne physiologie laryngée, en particulier les conditions d'hydratation et la notion d'échauffement vocal sont basées sur le niveau laryngé de l'effort vocal [Vintturi, 2001b, Vilkman et al. 1999, Verdolini, 1994].

## 1.2 Le forçage vocal et l'ensemble du système phonatoire

La phonation n'est pas seulement un mécanisme laryngé. Elle fait intervenir la soufflerie pulmonaire et les organes résonateurs oraux et pharyngés. La respiration est essentielle à la production vocale : la voix est produite lors de l'expiration active. Alors que la respiration est abdominale et thoracique basse en voix normale, elle devient thoracique haute et superficielle en voix forte. [Cayreyre et al., 2005].

Certains auteurs soulignent l'implication des muscles du cou, en particulier les muscles laryngés extrinsèques dans la régulation de la pression sous-glottique lors de la phonation : il s'agit de muscles inspiratoires accessoires mis en jeu pour réguler l'expiration. [Pettersen et al., 2005]. D'autres publications intègrent le forçage vocal dans un contexte de tension des muscles laryngés extrinsèques [Angsuwarangsee et Morrison, 2002, Morrison, 1997]. Les interactions entre la posture du corps et le contrôle respiratoire ont été étudiées en comparant le volume pulmonaire et/ou la

pression sous-glottique au cours de la station debout et en décubitus dorsal [Hoit, 1997, Sundberg et al., 1991].

Le pharynx et la cavité orale sont très impliqués dans l'articulation. Leur contribution peut être appréhendée par l'étude des caractéristiques spectrales de la voix lors de l'effort vocal et par l'étude de l'articulation proprement dite. L'étude du spectre de la voix est un indicateur indirect de la position des organes résonateurs. Ces données ont été étudiées en parole Lombard (parole en environnement bruyant, voir infra).

Concernant le versant articulatoire proprement dit, l'effort vocal se manifeste par un raccourcissement des consonnes au profit des voyelles sans allongement de l'énoncé lorsque le sujet n'est pas en situation de communication [Schulman, 1989]. Un allongement global de la durée d'énoncé a été constaté lors de la production de signifiants [Van Summers et al., 1988, Rothman et al., 2002]. Une accentuation des mouvements des lèvres en situation de communication difficile a été décrite [Van Summers et al., 1988, Bailly, 2005]. Cette amplification nécessite davantage de temps pour être réalisée mais cette explication « mécanique » ne semble pas suffisante. L'allongement de durée d'énoncé semble associé à une volonté d'accentuer les éléments importants du discours.

### 1.3 Le forçage vocal et l'ensemble du corps

Les interactions entre la fonction respiratoire et la posture ont été évoquées plus haut. Plusieurs arguments impliquent la posture dans le comportement de forçage vocal. Chez certains sujets présentant des troubles posturaux, la prise en charge posturale s'accompagne d'une amélioration de la qualité de leur voix [Wilson Arboleda et Fredericks, 2008] De façon intéressante, Kitch note que l'épisode de



fatigue vocale s'accompagne chez les acteurs de tensions musculaires thoraciques et dorsales. Cette plainte n'est pas retrouvée chez les chanteurs de son étude [Kitch et Oates, 1994].

Au plan expérimental, des modifications posturales contemporaines de l'effort vocal ont été décrites. Ces modifications ont été étudiées dans leur globalité en analysant les excursions du centre de gravité des sujets au moyen d'une plate-forme de posturographie au cours d'un effort vocal [Grini et al., 1998, Bruno et al., 2007, Giovanni et al., 2008]. Ces excursions sont plus amples lors de l'effort vocal, principalement dans l'axe antéro-postérieur. La comparaison de l'index de variation de la variance de la vitesse des mouvements du centre de gravité mettait en évidence une différence significative entre les sujets sains et les patients dysphoniques [Grini et al. 1998, Giovanni et al. 2008]. Bruno souligne que la diminution des excursions du centre de gravité est corrélée avec le succès de la rééducation orthophonique [Bruno et al., 2007]. L'étude de Grini et al. s'intéressait également à la posture segmentaire de l'extrémité céphalique à l'aide d'un accéléromètre-inclinomètre. Elle permet de mettre en évidence un mouvement de translation vers l'avant et de rotation arrière du massif facial, de faible amplitude et contemporain de la phonation chez les sujets sains, alors que le mouvement est plus ample et plus irrégulier chez les sujets dysphoniques.

Une étude préliminaire centrée sur les modifications posturales segmentaires contemporaines de l'effort vocal a mis en évidence une augmentation significative des mouvements de la tête et de la partie supérieure du corps lorsque l'on compare trois situations modélisant les voix normale, projetée et de détresse de F. Le Huche. [Giovanni et al., 2006]

Afin d'étudier les comportements d'effort et de forçage vocal, le facteur environnemental est le plus aisé à contrôler de façon expérimentale. Ainsi, notre expérimentation étudiera le comportement d'un sujet dans des conditions de communication en environnement bruyant. L'adaptation de la parole dans ce contexte est connue sous le terme d'Effet Lombard.

## **2- Modélisation de l'effort vocal : la parole Lombard**

### 2.1 Définition de l'effet Lombard

L'effet Lombard est la modification de la parole en présence d'un bruit qui diminue pour le sujet le retour auditif de sa propre voix. Ce phénomène a été décrit au début du XX<sup>e</sup> siècle par E.Lombard, oto-rhino-laryngologiste français : « le locuteur, qui n'entend pas mieux sa propre voix que les bruits extérieurs, s'efforce de remédier à cette audition défailante en augmentant l'intensité du son glottique » [E. Lombard in Bailly, 2005]. Pour Lombard et certains auteurs ultérieurs [Garde, 1965 in Dejonckere et Pépin, 1983] ; il s'agit d'un réflexe purement physiologique. Depuis les années 1970, l'effet Lombard est considéré comme une régulation ayant pour objectif d'améliorer l'intelligibilité de la parole [Lane et Tranel, 1971 in Dejonckere et Pépin]. P. De Jonckere souligne l'importance de la notion de communication et de l'impératif d'intelligibilité. Ce dernier facteur est d'ordre comportemental, conscient ou semi-conscient, et il semble potentialiser considérablement l'effet basal qui est d'ordre réflexe [Dejonckere et Pépin, 1983, Pick et al. 1989].

### 2.2 La parole Lombard est-elle un bon reflet de l'effort vocal ?

La parole Lombard, en particulier en mettant le sujet en présence d'un interlocuteur, apparaît comme une bonne représentation de l'effort vocal, puisqu'il s'agit d'amener le sujet à fournir davantage d'énergie pour maintenir l'intelligibilité de

sa parole dans un environnement défavorable. Le sujet emploie alors les mécanismes de la voix projetée ou de la voix de détresse.

## 2.3 Caractéristiques acoustiques et physiologiques de la parole Lombard

### 2.3.1 Caractéristiques acoustiques habituelles de la voix

Toutes les études retrouvent une augmentation de l'intensité de la voix en environnement bruyant. L'intensité croît avec l'augmentation de l'intensité du bruit. La F0 augmente également dans toutes les études où elle est étudiée [Södersten et al., 2005, Ternström et al., 2006, Van Summers et al., 1988, Garnier, 2007]. Le phonétogramme au cours de la production vocale spontanée voit son aire augmenter puis diminuer avec un bruit croissant [Södersten et al., 2005].

### 2.3.2 Caractéristiques spectrales de la voix

Van Summers retrouve une diminution de la pente de la ligne de régression du spectre avec le bruit, traduisant une augmentation de l'énergie dans les hautes fréquences du spectre, ceci n'étant pas seulement lié à l'élévation de la F0. Garnier trouve une augmentation de l'énergie acoustique particulièrement importante dans les zones 1-2KHz et 2-4 KHz, plus marquée que dans les autres bandes [Garnier, 2007]. Pour Ternström, l'effort vocal permet de limiter la dégradation du spectre de la voix dans les hautes fréquences jusqu'à un seuil d'effort propre à l'individu, où l'effort ne permet plus cette amélioration, c'est la notion de « saturation du spectre ».

L'étude des formants des voyelles retrouve une élévation de la fréquence centrale du premier formant avec le bruit. Le deuxième formant n'est pas modifié de façon uniforme ni significative pour toutes les voyelles. [Van Summers et al., 1988, Garnier, 2007].

### 2.3.3 Caractéristiques temporelles de la production vocale

L'allongement de la durée de phonation est retrouvé [Södersten et al., 2005, Van Summers et al., 1988]. Södersten précise que cet allongement dépend de la nature du bruit : la durée totale de la phonation augmente lors de l'exposition au bruit blanc, mais pas en cas de bruit discontinu. Le ratio de phonation augmente en conditions bruyantes, quelles que soient les caractéristiques du bruit.

### 2.3.4 Analyse perceptive de la voix

La caractérisation perceptive de la voix lors de l'effet Lombard retrouve une voix pressée, tendue en post-tâche et une augmentation de l'instabilité/irrégularité de la voix avec le bruit [Södersten et al., 2005]. Van Summers a montré qu'à rapport signal/bruit constant, l'intelligibilité du discours est améliorée lors d'une exposition au bruit.

### 2.3.5 Physiologie laryngée

L'étude de la fermeture glottique par filtrage inverse retrouve une phase de fermeture plus rapide (diminution du quotient d'amplitude et de sa valeur rapportée à la période glottique), [Vilkman et al. 2002] et un quotient fermé plus grand [Ternström et al. 2006] lors de la parole dans un milieu bruyant. Ceci est également retrouvé en électroglottographie avec une augmentation de la vitesse de fermeture des cordes vocales et une diminution du quotient ouvert [Garnier, 2007]. Ces données sont concordantes avec les résultats obtenus au cours d'un effort vocal consciemment produit par le sujet [Huang, 1995].

## Chapitre 3 : La posture

### **1-Les acteurs du contrôle postural**

#### 1.1 Les informations sensorielles

Plusieurs systèmes sensoriels sont impliqués dans le maintien de la posture : les afférences visuelles, vestibulaires et proprioceptives. Les afférences sensitives cutanées ont plus récemment été mises en lumière [Jeka et Lackner, 1994], de même que l'existence de gravicepteurs viscéraux au niveau du tronc [Mittelstaedt, 1995].

#### 1.2 L'intégration neurophysiologique

Le contrôle postural fait intervenir possiblement l'ensemble du système nerveux. [Massion, 1994]. Les centres les mieux connus sont le cervelet, les ganglions de la base et le cortex moteur. Le maintien de la posture au cours d'un mouvement volontaire d'un segment corporel résulterait d'un double contrôle central : le premier produirait le mouvement, le second contrôlerait les ajustements posturaux nécessaires au maintien de l'équilibre au cours de ce mouvement [Crenna et al., 1987]. Il existerait au sein de ces centres des schémas pré-établis des synergies et des types de mouvements permettant le maintien de l'équilibre [Bernstein in Latash, 2008].

### **2- Réagir ou anticiper**

#### 2.1 Les fonctions d'orientation et de stabilisation

La posture a pour fonctions l'orientation et la stabilisation (équilibre) [Massion et al. 1998]. L'orientation est la composante qui détermine la position des segments

corporels les uns par rapport aux autres et par rapport à l'environnement. Ceci permet de déterminer l'orientation dans l'espace d'un membre effecteur. Dans le cas de la communication verbale, la posture orientera l'ensemble du corps et en particulier la tête vers l'auditeur. La stabilisation est l'ensemble des forces mises en jeu pour maintenir l'équilibre, la position et l'orientation du corps ou d'un segment.

## 2.2 Synergies axiales et stratégies posturales

Une synergie est la mise en jeu de façon coordonnée de plusieurs muscles. Les principaux groupes musculaires mis en jeu dans les synergies posturales sont ceux des membres inférieurs et du tronc. Les stratégies posturales ont été décrites par Horak et Nashner en 1986 [Horak et Nashner, 1986]. Il existe trois stratégies mises en jeu de façon successives au cours d'un déséquilibre d'intensité croissante : la stratégie de cheville, la stratégie de hanche et l'abaissement du centre de gravité, une dernière possibilité est la réalisation d'un pas. Elles consistent en la réalisation d'un mouvement de sens opposé à celui du déséquilibre. Le contrôle de l'équilibre fait intervenir des ajustements qui sont rétroactifs lorsque la perturbation ne peut être anticipée par le sujet.

## 2.3 Les ajustements posturaux anticipés (APA)

Lorsque la perturbation est prévisible comme par exemple au cours d'un mouvement volontaire, les ajustements posturaux précèdent l'initiation de ce mouvement. [Zattara et Bouisset, 1986, Massion, 1992].

Ces ajustements posturaux présentent trois finalités : 1- assurer l'équilibre et maintenir la posture en dépit des perturbations causées par le mouvement, 2- assurer une préparation posturale préalable à la réalisation du mouvement,

notamment lors des mouvements d'un membre inférieur, 3- assurer l'assistance du mouvement en termes de force ou de vitesse. [Massion, 1997, Latash et al.2005]

Il existerait deux périodes au sein d'un APA [Zattara et Bouisset, 1986]: une période précoce, lente pour préparer la posture à l'exécution du mouvement et une période tardive, dynamique, préprogrammée et spécifique du mouvement volontaire réalisé. [Belen'kii et al 1967 in Massion 1992]

#### 2.4 Synergies axiales lors d'une antéflexion volontaire du tronc

Lors d'un mouvement volontaire d'inclinaison du tronc vers l'avant, les synergies posturales impliquent un déplacement simultané de la hanche, et des genoux dans la direction opposée à celle du tronc par une extension de la cheville afin de compenser avec précision le déplacement du centre de gravité qu'aurait produit le seul mouvement des hanches, et ainsi d'assurer l'équilibre postural [Crenna et al.,1987 ; Massion, 1996 ; Vernazza et al.,1999, Alexandrov et al, 1998 et .2001].

### **3- Les doubles tâches**

La réalisation concomitante d'une tâche cognitive et d'une tâche posturale peut parfois modifier les performances de l'une ou l'autre de ces tâches (amélioration ou détérioration). Deux explications sont possibles.

1-Les tâches cognitives et le contrôle postural semblent employer les mêmes mécanismes et entrent en compétition lors de la réalisation d'une tâche cognitive complexe alors que la posture doit être maintenue. [Kerr et al., 1985]

2- La capacité attentionnelle du sujet nécessaire à la réalisation de chacune de ces tâches est dépassée. Au point de vue postural, cela se traduit par des mouvements du centre de gravité plus rapides, témoins d'une activité musculaire plus importante [Olivier et al., 2007]. On peut faire l'hypothèse que la parole, activité éminemment cognitive, peut aussi dans certains cas perturber la posture.



## **Deuxième partie : Etude expérimentale**

### **Chapitre 1 : Matériel et méthodes**

#### **1- Sujets**

L'étude a porté sur 20 sujets de sexe féminin, âgés de 22 à 43 ans. Cette population a été choisie car la population des patients présentant des dysphonies dysfonctionnelles, et notamment des nodules des cordes vocales, est la population féminine adulte de moins de 45 ans. Aucun des sujets n'avait d'antécédents de trouble vocal, postural ou auditif.

#### **2- Situations expérimentales**

##### **2.1 Tâches**

Afin de reproduire une situation de communication, le sujet devait énoncer des nombres à un auditeur situé à 4 ou 10 mètres. Ce dernier inscrivait les nombres qu'il entendait sur un tableau afin que le sujet ait un retour sur l'efficacité de sa voix en termes de communication. Le sujet ne pouvait réaliser qu'un essai par nombre proposé. En cas d'inefficacité (erreur de retranscription par l'auditeur), le sujet devait adapter sa production vocale pour l'essai suivant.

##### **2.2 Corpus**

Le matériel phonétique de notre corpus devait répondre à certaines contraintes liées à la nécessité d'implication du sujet locuteur et à la nécessité de réduire autant que possible les tâches de mémoire. C'est pourquoi nous avons choisi des nombres plutôt que des logatomes ou des phrases entières.

Les autres contraintes étaient en particulier liées à l'étude de la fréquence fondamentale. Afin de perturber le moins possible celle-ci, les nombres choisis devaient comporter principalement des consonnes nasales (voisées) et des latérales qui n'entraînent que peu de perturbations locales de la mélodie [Di Cristo, 1978].

Nous n'avons cependant pu éviter la consonne /f/ (fricative non voisée), mais elle n'est jamais en situation pré-vocalique. (Annexe Matériel et méthodes 1)

### 2.3 Trois conditions expérimentales

Les trois conditions expérimentales devaient modéliser les trois modalités de la voix proposées par F. Le Huche [Le Huche, 1984] : Dans toutes les conditions, le sujet était debout, face à l'auditeur.

- Condition 1 : Voix normale (VN). Il n'y a pas de bruit ambiant et l'auditeur est situé à 4 mètres du sujet.
- Condition 2 : Voix projetée (VP). Il n'y a pas de bruit ambiant, et l'auditeur est à 10 mètres du sujet.
- Condition 3 : Voix de détresse, voix forcée (VF). Le sujet et l'auditeur sont soumis à un bruit de cocktail (Phonak, CD1 Party noise, night) d'une intensité moyenne de 90dB au moyen d'un casque. L'auditeur est à 10 mètres du sujet.

## **3- Enregistrement des paramètres vocaux**

### 3.1 Instrumentation

Les signaux électroglottographiques (EGG) étaient recueillis par un laryngographe (de Laryngograph), puis traités et analysés par le logiciel SESANE (SQLab, Aix en Provence, France). Le système EGG mesure l'impédance électrique

des tissus cervicaux situés entre deux électrodes placées de part et d'autre du cartilage thyroïde et maintenues au contact de la peau par un collier élastique. Les signaux acoustiques étaient recueillis par un micro-casque (AKG C420) situé à 6 cm de la commissure des lèvres. Les données étaient acquises et analysées par le logiciel SESANE, de façon simultanée avec l'EKG.

### 3.2 Paramètres étudiés

La F0 a été déterminée à partir de l'EKG par une méthode de détection de pics. La F0 moyenne et le coefficient de variation de la F0 ont été étudiés. Ils sont exprimés en Hertz.

Le quotient de fermeture a été déterminé à partir du tracé EKG, par une méthode de seuil. Le seuil était à 35% de l'amplitude du tracé, conformément à la méthode décrite par Rothenberg [Rothenberg et Mahshie, 1988]. Il correspond à la durée du cycle glottique pendant laquelle les cordes vocales sont en contact, rapportée à la durée totale du cycle. Il s'exprime en pourcentage.

L'intensité vocale était mesurée simultanément par le logiciel SESANE. Sa valeur moyenne a été étudiée, elle est exprimée en décibels (dB SPL). Les limites du signal acoustique ont permis de déterminer la durée des énoncés, exprimée en millisecondes (ms). Les mots dissyllabiques et trisyllabiques ont été séparés pour l'étude de ce paramètre.

Les pauses au sein des mots étaient localisées perceptivement, et leur durée était calculée automatiquement (logiciel SESANE). La durée totale des pauses a été rapportée à la durée totale de l'énoncé afin d'évaluer l'évolution propre de ces pauses, indépendamment du comportement global de la durée de l'énoncé. La durée des pauses est exprimée en pourcentage de la durée des mots.

## **4- Enregistrement des paramètres posturaux**

### 4.1 Instrumentation

L'acquisition des données cinématiques a été effectuée à l'aide du système SMART d'analyse automatique du mouvement [Pedotti et Ferigno, 1985]. Ce système d'acquisition est un système optoélectrique passif, dont le principe est basé sur la reconnaissance de marqueurs réfléchissants placés sur des repères anatomiques du sujet (Figure 2). L'enregistrement a été réalisé par 5 caméras, émettant des flashes infra-rouges qui sont réfléchis par les marqueurs. Ce système permet un traitement ultérieur des images dans les trois dimensions de l'espace. La fréquence d'acquisition est de 120 Hz. Ce système permet de calculer les déplacements linéaires et angulaires des segments définis par les marqueurs toutes les 8.33 ms. La précision des mesures acquises est de  $1/1500^{\text{ème}}$  du champ, soit une précision au millimètre près. La précision angulaire dépend de la longueur du segment analysé.

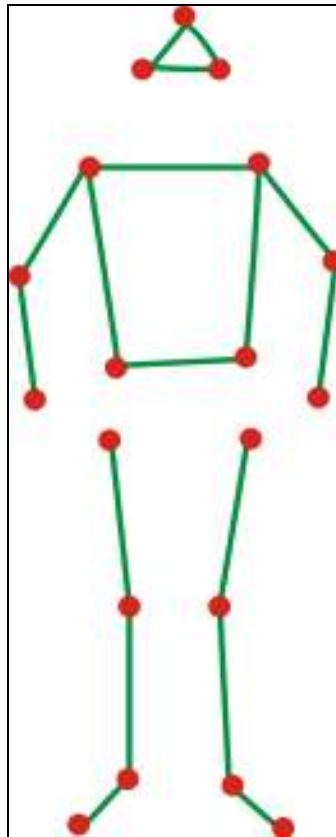


Figure 2 : place des marqueurs sur les repères anatomiques du sujet : milieu du front, tempes droite et gauche, deux épaules, deux coudes, deux poignets, deux épines iliaques antérieures, deux trochanters, deux genoux, deux malléoles externes, cinquièmes métatarsiens droit et gauche.

#### 4.2 Paramètres étudiés

Pour caractériser l'amplitude des mouvements, nous avons calculé dans un premier temps les dispersions angulaires. Les dispersions angulaires sont calculées sur le signal d'une composante angulaire donnée sur une période commençant 1 seconde avant le début de la production vocale et se terminant 1.5 seconde après. Elles correspondent à l'écart-type de la distribution des valeurs d'angles correspondantes et renseignent sur l'amplitude des mouvements réalisés. Elles ont été calculées dans les trois plans de l'espace pour les segments de la tête et du tronc. Les dispersions angulaires du tronc dans le plan axial ont été calculées à partir

de la position des épaules. Les dispersions angulaires sont exprimées en degrés d'angle.

Dans un deuxième temps, la posture segmentaire de la tête, du tronc et des cuisses a été étudiée spécifiquement dans le plan sagittal (mouvements de tangage) pour les conditions de voix projetée (VP) et de voix de détresse (VF). En effet, le mouvement de chaque segment n'était analysable que dans ces deux conditions car en condition VN, les mouvements étaient de trop faible amplitude ( $<1^\circ$ ), et non distinguables du balancement spontané du corps.

Les paramètres étudiés ont été les angles formés respectivement entre le tronc, les cuisses et la tête et un axe vertical, dans le plan sagittal. Le mouvement de translation de la tête a également été étudié dans le sens antéro-postérieur. Les mouvements sont représentés sous forme de courbes qui varient dans un sens positif lorsque le mouvement se fait vers l'avant, et dans un sens négatif lorsque le mouvement se fait vers l'arrière du sujet (Figure3). Pour chacun des segments corporels, la durée du mouvement (en ms) et l'amplitude (en degrés d'angle) ont été étudiés.

L'étude des mouvements a été synchronisée avec l'enregistrement de la voix. Ainsi, plusieurs paramètres de synchronisation ont pu être étudiés : le délai entre le début du mouvement et le début de l'énoncé, le délai entre la fin de l'énoncé et la fin du mouvement, le rapport de durée de l'énoncé et de durée du mouvement. Tous ces paramètres ont été exprimés en millisecondes (ms) (Figure 3).

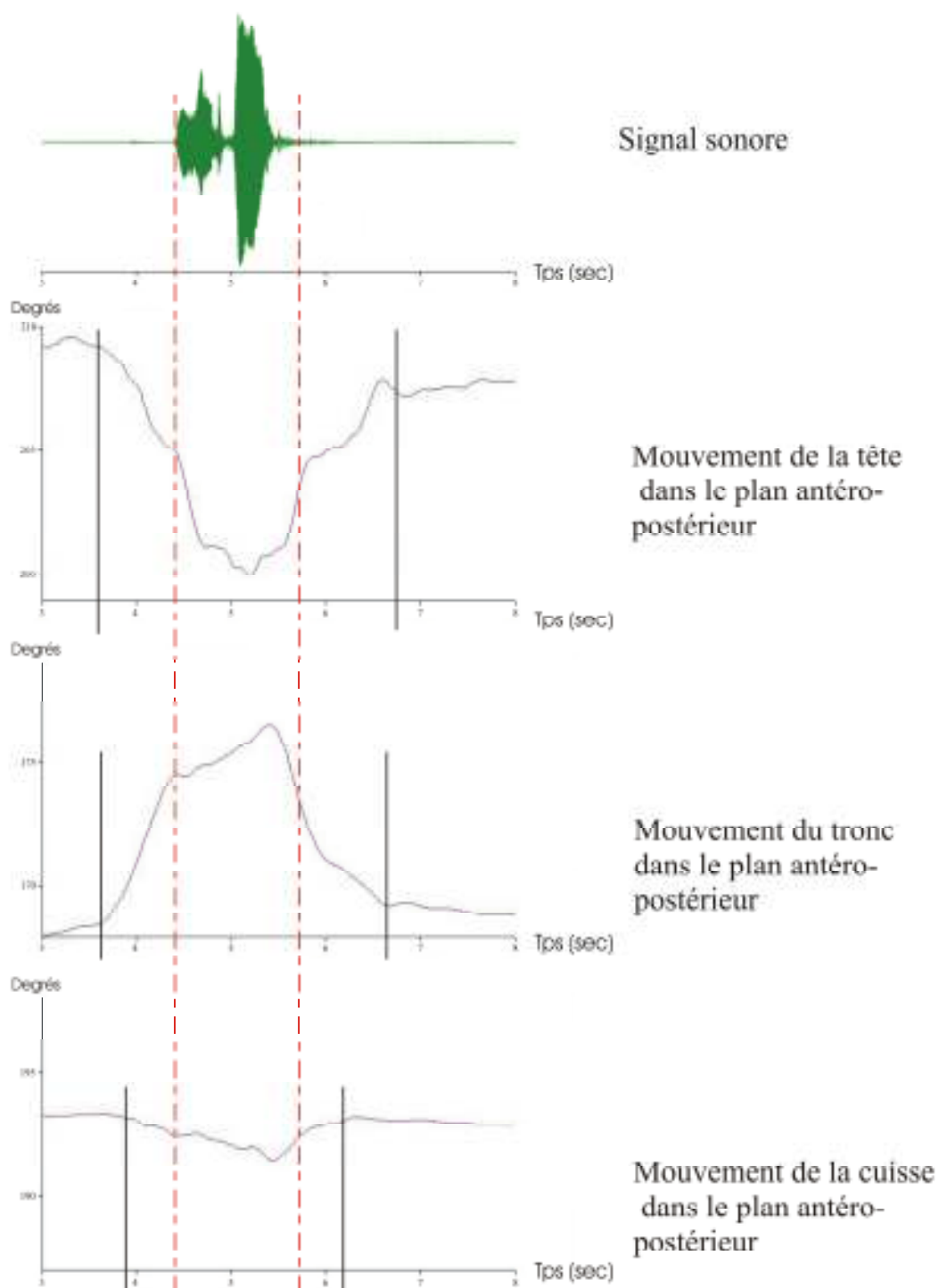


Figure 3 : Exemple du sujet 2, essai16 : « 1020 », condition de voix forcée: Courbes avec la synchronisation de l'enregistrement sonore (en haut), puis des mouvements de la tête, du tronc et de la cuisse (de haut en bas). Les mouvements sont étudiés dans le plan antéro-postérieur. Les repères noirs désignent le début et la fin du mouvement de chaque segment, les repères rouges désignent le début et la fin de l'énoncé.

## **5- Analyses statistiques**

Les comparaisons de variables ont été réalisées à partir des valeurs obtenues pour chaque sujet dans chaque condition. Le test de Friedman (non paramétrique) a été employé pour évaluer l'effet global de la tâche lorsque la variable est mesurée dans les trois conditions. Le test des signes des rangs de Wilcoxon, test non paramétrique pour échantillons appariés a été utilisé pour comparer les conditions deux à deux. Les corrélations entre variables calculées pour chaque sujet utilisent le coefficient de Spearman (non paramétrique). Le seuil de significativité accepté était  $p < 0.05$ .



## Chapitre 2 : Résultats

### 1- Les données d'analyse de la voix et de la parole

#### 1.1 L'intensité vocale moyenne

La figure 4 résume les résultats concernant l'intensité moyenne. Les médianes et quartiles sont résumés dans le tableau I. Il existe un effet global significatif de la tâche ( $\chi^2=36.4$ ,  $p<0.001$ ). L'intensité vocale moyenne est significativement augmentée entre la voix normale et la voix projetée ( $Z=-3.58$ ,  $p<0.001$ ), entre la voix projetée et la voix forcée ( $Z=-3.92$ ,  $p<0.001$ ), et entre la voix forcée et la voix normale ( $Z=-3.92$ ,  $p<0.001$ ).

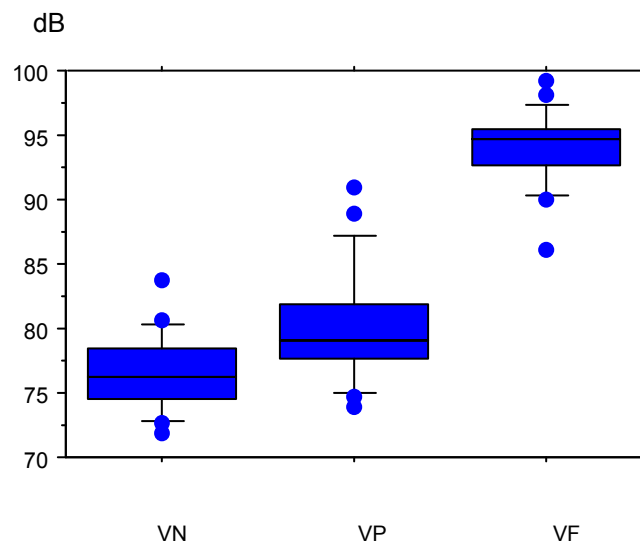


Figure 4 : Médianes et quartiles pour l'intensité moyenne dans les conditions de voix normale (VN), voix projetée (VP), voix forcée (VF).

	25 <sup>ème</sup> percentile	médiane	75 <sup>ème</sup> percentile
VN	74.32	76.25	78.88
VP	77.53	79.12	82.37
VF	92.22	94.74	95.69

Tableau I : statistiques descriptives de l'intensité moyenne en conditions de voix normale (VN), voix projetée (VP), voix forcée (VF). (médianes et quartiles en dB)

## 1.2 La fréquence fondamentale (F0)

Les données concernant la fréquence fondamentale et le quotient de fermeture ont porté sur 15 sujets. En raison de la perte d'un nombre de données trop important (>50% des essais), les sujets 3, 6, 7, 10 et 11 n'ont pas été pris en compte pour les analyses statistiques.

### Fréquence fondamentale moyenne

La figure 5 résume les résultats concernant la fréquence fondamentale moyenne. Les médianes et quartiles sont résumés dans le tableau II. Il existe un effet significatif de la tâche ( $\chi^2=25.2$ ,  $p<0.001$ ). La fréquence fondamentale moyenne est significativement augmentée entre la voix normale et la voix projetée ( $Z=-3.07$ ,  $p<0.01$ ), entre la voix projetée et la voix forcée ( $Z=-3.41$ ,  $p<0.01$ ), et entre la voix forcée et la voix normale ( $Z=-3.52$ ,  $p<0.001$ ).

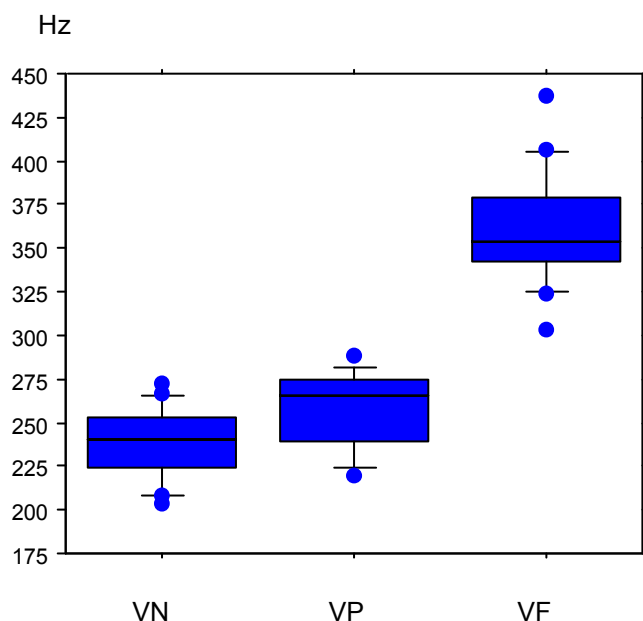


Figure 5 : Médianes et quartiles pour la fréquence fondamentale moyenne dans les conditions de voix normale (VN), voix projetée (VP), voix forcée (VF).

	25 <sup>ème</sup> percentile	médiane	75 <sup>ème</sup> percentile
VN	221.8	236.5	254.7
VP	238.2	265.7	276.4
VF	344	360.4	380

Tableau II : statistiques descriptives de la fréquence fondamentale moyenne en conditions de voix normale (VN), voix projetée (VP), voix forcée (VF), en Hertz (Hz). (médianes et quartiles)

### Coefficient de variation de la fréquence fondamentale

La figure 6 résume les résultats concernant le coefficient de variation de la fréquence fondamentale. Les médianes et quartiles sont résumés dans le tableau III. Il existe un effet significatif de la tâche ( $\chi^2=23.33$ ,  $p<0.001$ ). Le coefficient de variation de la fréquence fondamentale est significativement augmenté entre la voix

projetée et la voix forcée ( $Z=-3.41$ ,  $p<0.001$ ), et entre la voix forcée et la voix normale ( $Z=-3.52$ ,  $p<0.001$ ). Par contre, il n'y a pas de différence significative entre la voix normale et la voix projetée ( $Z=-1.48$ ,  $p>0.05$ ).

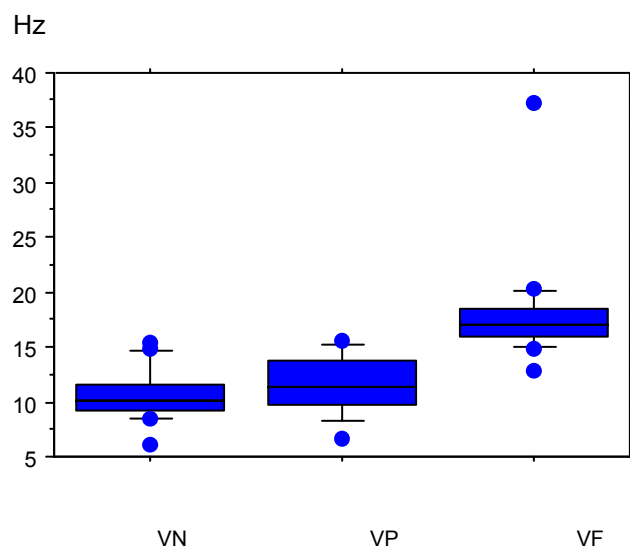


Figure 6 : Médianes et quartiles pour le coefficient de variation de la fréquence fondamentale dans les conditions de voix normale (VN), voix projetée (VP), voix forcée (VF).

	25 <sup>ème</sup> percentile	médiane	75 <sup>ème</sup> percentile
VN	9.5	10.2	11.7
VP	9.8	11.4	13.7
VF	16	17	18.6

Tableau III : statistiques descriptives du coefficient de variation de la fréquence fondamentale en conditions de voix normale (VN), voix projetée (VP), voix forcée (VF), en Hertz (Hz). (médianes et quartiles)

### Relation entre la fréquence fondamentale et l'intensité vocale

L'augmentation de la fréquence fondamentale moyenne est liée à l'augmentation de l'intensité moyenne. Néanmoins, le coefficient de proportionnalité présente une grande variabilité inter individuelle (Annexe Résultats 1).

### 1.3 : Quotient de fermeture

La figure 7 résume les résultats concernant le quotient de fermeture. Les médianes et quartiles sont résumés dans le tableau IV. Il existe un effet global de la tâche significatif ( $\chi^2=19.6$ ,  $p<0.001$ ). Le quotient de fermeture est significativement augmenté entre la voix projetée et la voix forcée ( $Z=-3.01$ ,  $p<0.01$ ), et entre la voix forcée et la voix normale ( $Z=-3.46$ ,  $p<0.01$ ). Par contre, il n'y a pas de différence significative entre la voix normale et la voix projetée ( $Z=-1.76$ ,  $p>0.05$ ).

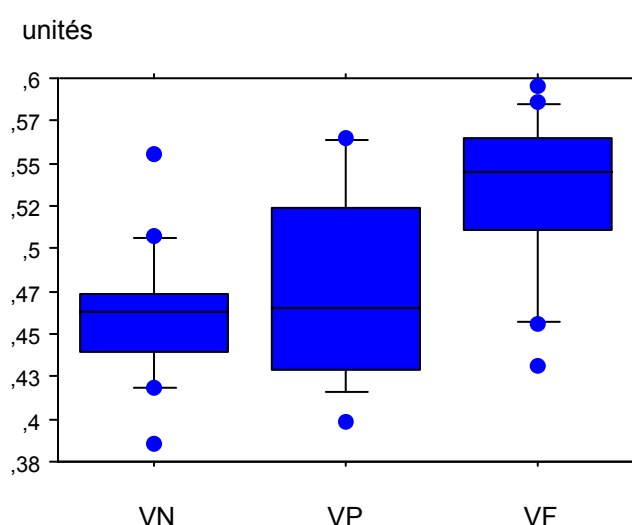


Figure 7 : Médianes et quartiles pour le quotient de fermeture dans les conditions de voix normale (VN), voix projetée (VP), voix forcée (VF).

	25 <sup>ème</sup> percentile	médiane	75 <sup>ème</sup> percentile
VN	0.436	0.461	0.475
VP	0.429	0.466	0.526
VF	0.494	0.544	0.565

Tableau IV : statistiques descriptives du quotient de fermeture en conditions de voix normale (VN), voix projetée (VP), voix forcée (VF), rapport de temps sans unité (durée de fermeture glottique/durée du cycle glottique). (médianes et quartiles)

## 1.4 Données temporelles

### Durée globale de l'énoncé

La figure 8 résume les résultats concernant les durées d'énoncé des mots dissyllabiques et trisyllabiques. Les médianes et quartiles sont résumés dans le tableau V. Il existe un effet global de la tâche pour les mots dissyllabiques ( $\text{Chi}^2=36.4$ ,  $p<0.001$ ), et pour les mots trisyllabiques ( $\text{Chi}^2=36.1$ ,  $p<0.001$ ). Les durées d'énoncé des mots dissyllabiques sont significativement augmentées entre la voix normale et la voix projetée ( $Z=-3.77$ ,  $p<0.001$ ), entre la voix projetée et la voix forcée ( $Z=-3.92$ ,  $p<0.001$ ), et entre la voix forcée et la voix normale ( $Z=-3.92$ ,  $p<0.001$ ). De même, les durées d'énoncé des mots trisyllabiques sont significativement augmentées entre la voix normale et la voix projetée ( $Z=-3.36$ ,  $p<0.01$ ), entre la voix projetée et la voix forcée ( $Z=-3.88$ ,  $p<0.001$ ), et entre la voix forcée et la voix normale ( $Z=-3.92$ ,  $p<0.001$ ).

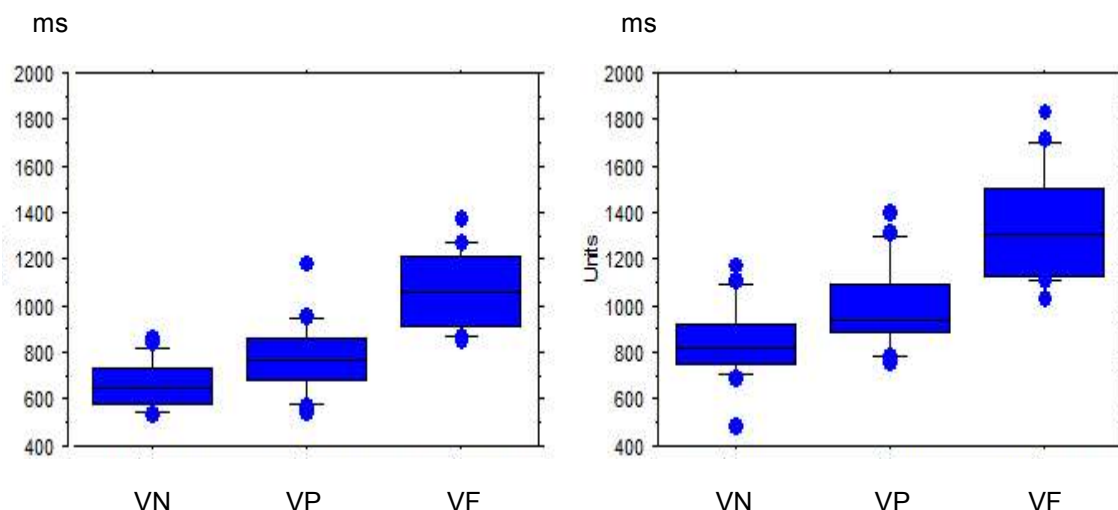


Figure 8 : Médianes et quartiles pour les durées d'énoncé des mots dissyllabiques (à gauche) et trisyllabiques (à droite) dans les conditions de voix normale (VN), voix projetée (VP), voix forcée (VF).

Mots	Voix	25 <sup>ème</sup> percentile	médiane	75 <sup>ème</sup> percentile
Dissyllabiques	VN	571	649	735
	VP	685	766	859
	VF	908	1060	1216
Trisyllabiques	VN	750	820	951
	VP	878	945	1118
	VF	1126	1308	1511

Tableau V : statistiques descriptives pour les durées d'énoncé des mots dissyllabiques et trisyllabiques en conditions de voix normale (VN), voix projetée (VP), voix forcée (VF), en ms. (médianes et quartiles)

#### Durée des pauses au sein de l'énoncé

L'annexe Résultats 2 récapitule les nombres au sein desquels les sujets réalisent des pauses. Il apparaît que certains nombres sont plus favorables à l'apparition de pauses que d'autres : le nombre 1001 est celui qui présente le plus systématiquement des pauses, y compris en voix normale.

La figure 9 résume les résultats concernant la durée des pauses. Il existe un effet global significatif de la tâche ( $\chi^2=17.57$ ,  $p<0.001$ ). Il existe une augmentation significative du pourcentage de durée des pauses au sein de l'énoncé entre VN et VP ( $Z=-2.32$ ,  $p<0.05$ ), entre VP et VF ( $Z=-3.51$ ,  $p<0.001$ ), et entre VN et VF ( $Z=-3.66$ ,  $p<0.001$ ).

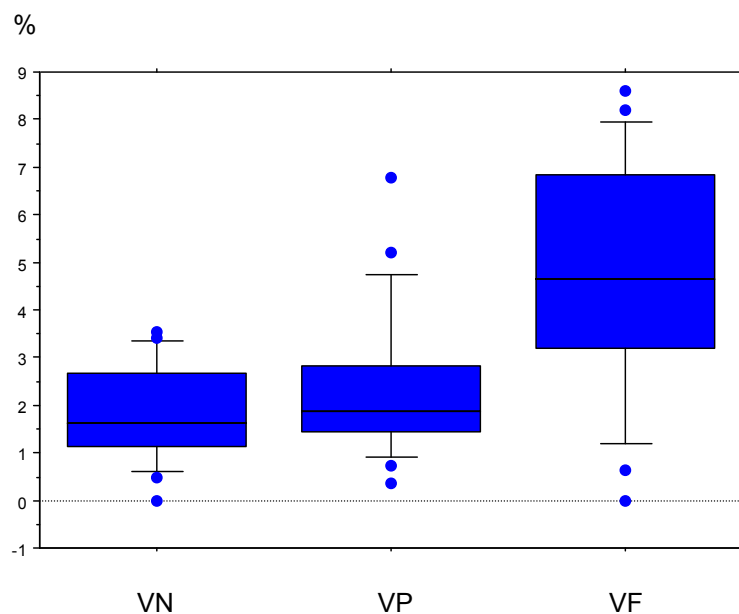


Figure 9 : durée des pauses en pourcentage de la durée des mots en conditions de voix normale (VN), voix projetée (VP), voix forcée (VF).

## 2- Les données posturales

### 2.1 Les dispersions angulaires

Les dispersions angulaires de la tête et du tronc ont été calculées dans les trois plans de l'espace pour chacun des deux segments.

#### Dispersion angulaire de la tête

Les valeurs des médianes et quartiles des dispersions angulaires de la tête dans les trois conditions et dans les trois plans de l'espace sont résumés dans le tableau VI.



		25 <sup>ème</sup> percentile	Médiane	75 <sup>ème</sup> percentile
VN	Plan frontal	0.8	1.2	1.5
	Plan horizontal	0.9	1.5	2.5
	Plan sagittal	1.5	1.9	3.4
VP	Plan frontal	0.5	1.2	1.7
	Plan horizontal	1	2.2	3
	Plan sagittal	2	3.1	3.9
VF	Plan frontal	1.3	1.6	1.9
	Plan horizontal	2.1	2.9	3.7
	Plan sagittal	3.1	3.8	5.1

Tableau VI : Statistiques descriptives des dispersions angulaires des mouvements de la tête en conditions de voix normale (VN), voix projetée (VP), voix forcée (VF), en degrés d'angles.

Dans le plan frontal, il existe un effet significatif de la tâche ( $\chi^2=6.1$ ,  $p=0.0474$ ) (Figure 10). Les dispersions angulaires de la tête sont significativement augmentées entre VP et VF ( $Z=-2.24$ ,  $p<0.05$ ) et entre VN et VF ( $Z=-2.54$ ,  $p<0.05$ ), mais il n'y a pas de différence significative entre VN et VP ( $p>0.05$ ).

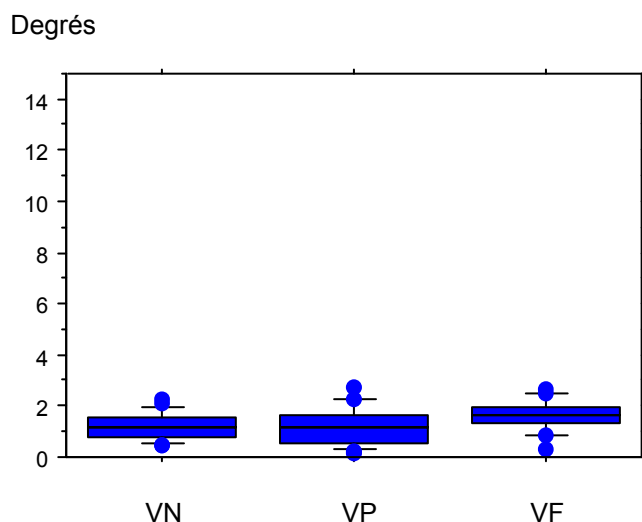


Fig. 10 :Médianes et quartiles des dispersions angulaires de la tête dans le plan frontal en conditions de voix normale (VN), voix projetée (VP), voix forcée (VF), en degrés.

Dans le plan horizontal, il existe un effet significatif de la tâche ( $\chi^2=9.3$ ,  $p<0.01$ ) (Figure 11). Les dispersions angulaires de la tête sont significativement augmentées entre VP et VF ( $Z=-2.95$ ,  $p<0.01$ ) et entre VN et VF ( $Z=-3.40$ ,  $p<0.001$ ), mais à nouveau, il n'y a pas de différence significative entre VN et VP ( $p>0.05$ ).

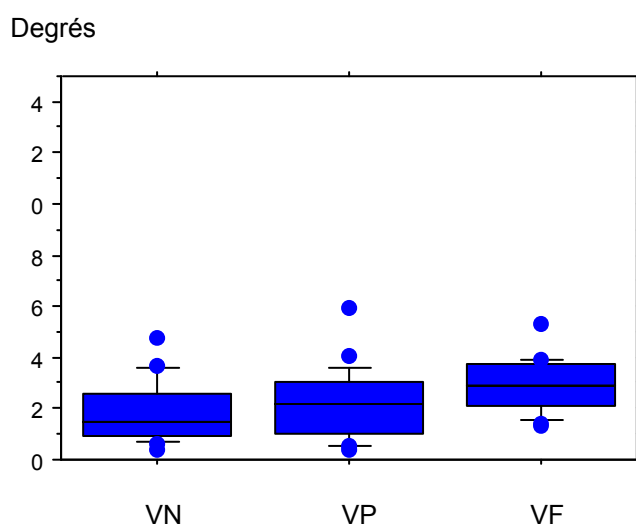


Fig. 11 :Médianes et quartiles des dispersions angulaires de la tête dans le plan horizontal conditions de voix normale (VN), voix projetée (VP), voix forcée (VF), en degrés.

Dans le plan sagittal, il existe un effet global significatif de la tâche ( $\chi^2=119.9$ ,  $p<0.0001$ ) (Figure 12). Les dispersions angulaires de la tête sont significativement augmentées entre VP et VF ( $Z=-2.99$ ,  $p<0.01$ ), entre VN et VP ( $Z=-2.46$ ,  $p<0.05$ ), et entre VN et VF ( $Z=-3.40$ ,  $p<0.001$ ).

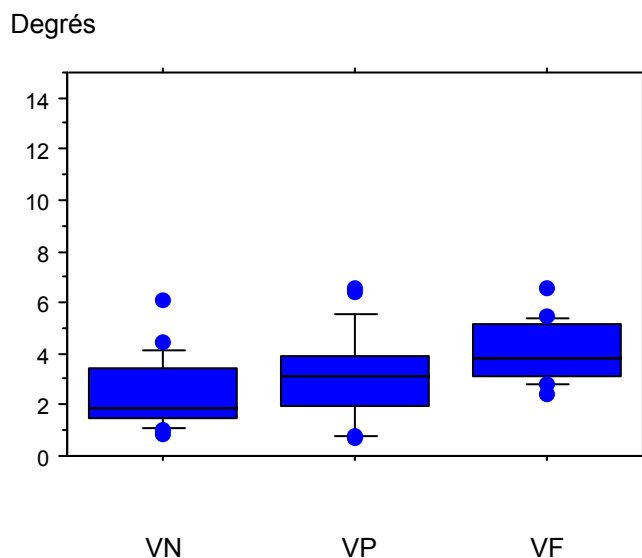


Fig. 12 :Médianes et quartiles des dispersions angulaires de la tête dans le plan sagittal en conditions de voix normale (VN), voix projetée (VP), voix forcée (VF), en degrés.

A travers les trois conditions, les dispersions angulaires sont plus importantes dans le plan sagittal que dans le plan horizontal (médianes :  $3.2^\circ$  vs  $2.3^\circ$ ,  $Z=-6.39$ ,  $p<0.0001$ ), elles sont également plus importantes dans le plan horizontal que dans le plan frontal (médianes :  $1.35^\circ$  vs  $2.29^\circ$ ,  $Z=-6.39$ ,  $p<0.0001$ ).

#### Dispersion angulaires du tronc

Les valeurs des médianes et quartiles dans les trois conditions et dans les trois plans de l'espace sont résumées dans le tableau VII.

		25 <sup>ème</sup> percentile	Médiane	75 <sup>ème</sup> percentile
VN	Plan frontal	0.2	0.2	0.4
	Plan horizontal	0.3	0.4	0.6
	Plan sagittal	0.2	0.3	0.4
VP	Plan frontal	0.1	0.2	0.4
	Plan horizontal	0.4	0.4	0.6
	Plan sagittal	0.3	0.4	0.6
VF	Plan frontal	0.3	0.4	0.6
	Plan horizontal	0.5	0.8	0.9
	Plan sagittal	0.8	1.6	4

Tableau VII : Statistiques descriptives des dispersions angulaires des mouvements du tronc en conditions de voix normale (VN), voix projetée (VP), voix forcée (VF), en degrés.

Il est à noter que les valeurs des dispersions angulaires du tronc sont très faibles ( $<1^\circ$ ) dans les plans axial et frontal pour toutes les conditions. Elles sont également très faibles dans le plan sagittal en conditions VN et VP.

Néanmoins, dans le plan frontal, il existe un effet global significatif de la tâche. Les dispersions angulaires du tronc sont significativement augmentées entre VP et VF ( $Z=-2.455$ ,  $p=0.014$ ) et entre VN et VF ( $Z=-3.92$   $p<0.0001$ ). Il n'y a cependant pas de différence significative entre VN et VP ( $p>0.05$ ).

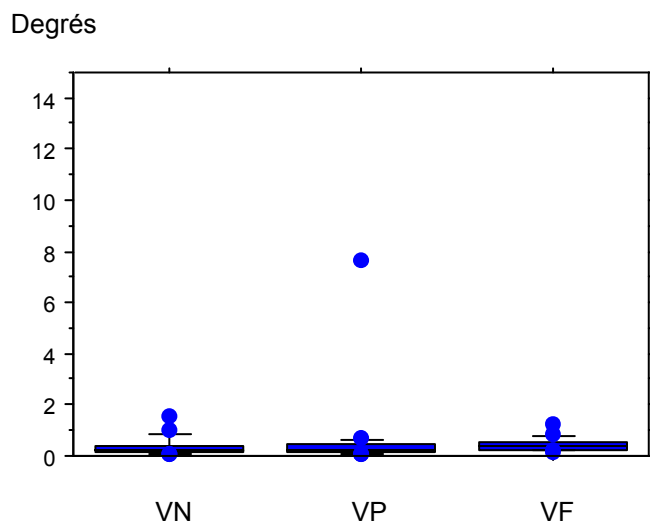


Fig.13 :Médianes et quartiles des dispersions angulaires du tronc dans le plan frontal en conditions de voix normale (VN), voix projetée (VP), voix forcée (VF), en degrés.

Dans le plan horizontal, il existe également un effet significatif de la tâche ( $\chi^2=12.9$ ,  $p<0.01$ ). Les dispersions angulaires des épaules sont significativement augmentées entre VP et VF ( $Z=-2.95$ ,  $p<0.01$ ) et entre VN et VF ( $Z=-2.58$ ,  $p<0.05$ ), mais il n'y a pas de différence significative entre VN et VP ( $p>0.05$ ). Ces données sont également d'interprétation difficile compte tenu de leur faible valeur ( $<1^\circ$ ).

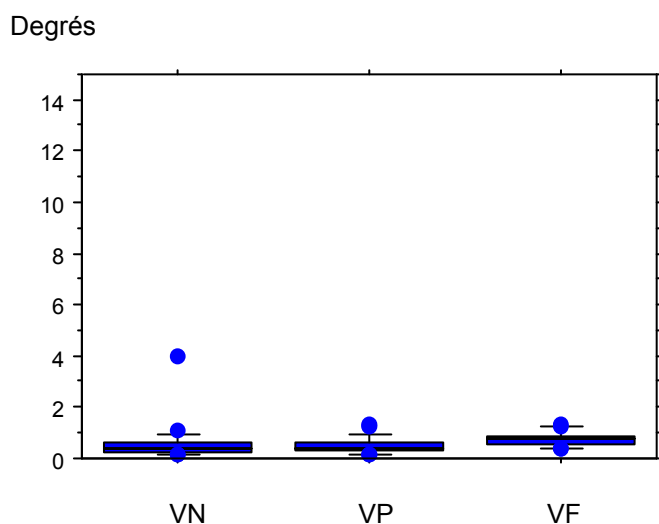


Fig. 14 :Médianes et quartiles des dispersions angulaires de la tête dans le plan horizontal en conditions de voix normale (VN), voix projetée (VP), voix forcée (VF), en degrés.

Dans le plan sagittal, il existe un effet significatif global de la tâche ( $\chi^2=27.7$ ,  $p<0.0001$ ). Les dispersions angulaires du tronc sont significativement augmentées entre VP et VF ( $Z=-3.92$ ,  $p<0.0001$ ) et entre VN et VF ( $Z=-3.81$ ,  $p<0.001$ ), mais il n'y a pas de différence significative entre VN et VP ( $p>0.05$ ).

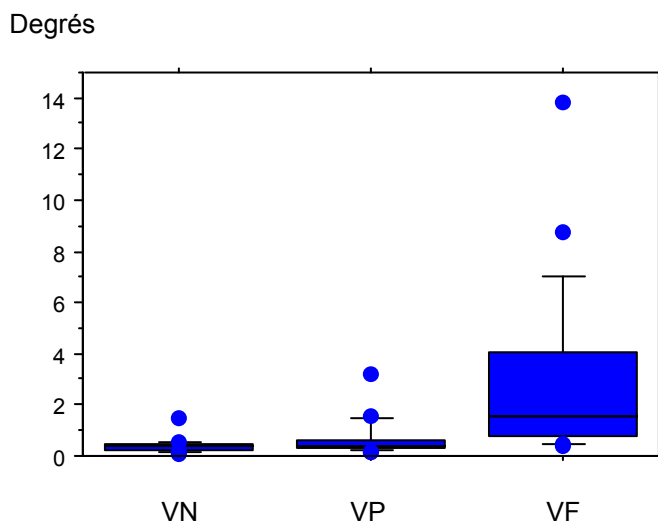


Fig. 15 :Médianes et quartiles des dispersions angulaires de la tête dans le plan sagittal en conditions de voix normale (VN), voix projetée (VP), voix forcée (VF), en degrés.

En VN et VP, il n'y a pas de différence significative entre les dispersions angulaires du tronc dans les trois plans de l'espace et elles sont inférieures à  $1^\circ$ . En VF, les dispersions angulaires sont significativement plus importantes dans le plan sagittal par rapport aux deux autres plans ( $Z=-3.92$ ,  $p<0.0001$ ) entre le plan sagittal et le plan frontal ( $Z=-3.32$ ,  $p<0.001$ ) entre le plan sagittal et le plan horizontal). Elles sont également plus importantes dans le plan horizontal que dans le plan frontal ( $Z=-3.43$ ,  $p<0.001$ ) dans cette condition, ce qui concorde avec les données concernant la tête.

Compte tenu des faibles mouvements en VN, seules les conditions VP et VF ont été retenues pour les autres indices concernant la posture. De même la suite de l'étude s'est concentrée sur le mouvement de tangage (dans le plan sagittal).

## 2.2 Durée des mouvements

### Les mouvements du tronc

La figure 16 résume les résultats concernant les durées de mouvement du tronc pour les mots dissyllabiques et trisyllabiques. Les médianes et quartiles sont présentés dans le tableau VIII.

Les durées de mouvement du tronc pour les mots dissyllabiques sont significativement augmentées entre la voix projetée et la voix forcée ( $Z=-3.92$ ,  $p<0.001$ ). De même, les durées de mouvement du tronc pour les mots trisyllabiques sont significativement augmentées entre la voix projetée et la voix forcée ( $Z=-3.62$ ,  $p<0.001$ ).

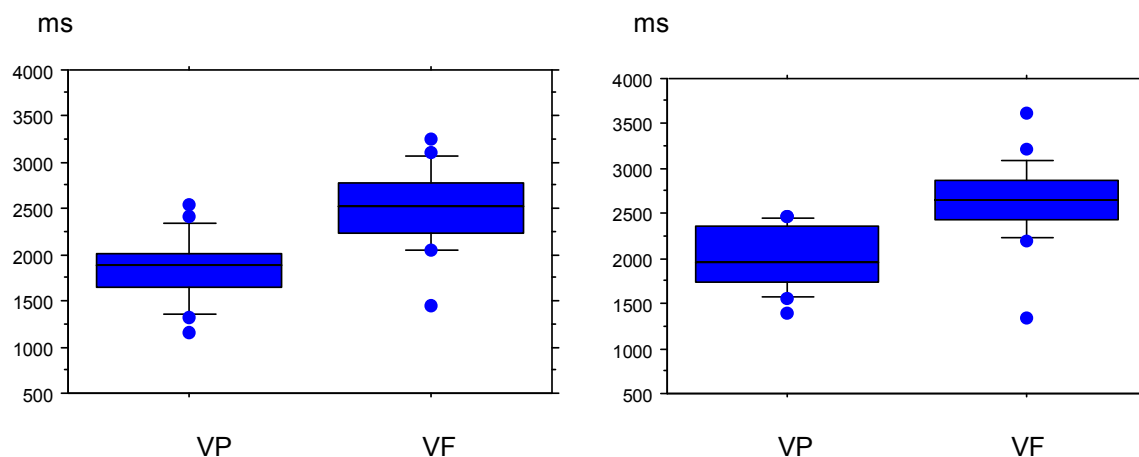


Figure 16 : Médianes et quartiles pour les durées de mouvement (en ms) du tronc pour les mots dissyllabiques (à gauche) et trisyllabiques (à droite) en voix projetée (VP) et en voix forcée (VF).

Mots	Voix	25 <sup>ème</sup> percentile	médiane	75 <sup>ème</sup> percentile
Dissyllabiques	VP	1634	1888	2018
	VF	2205	2516	2842
trisyllabiques	VP	1730	1958	2397
	VF	2399	2644	2896

Tableau VIII : Statistiques descriptives pour les durées de mouvement du tronc (en ms) pour les mots dissyllabiques et trisyllabiques en voix projetée (VP) et en voix forcée (VF). (médianes et quartiles)

### Les mouvements de cuisse

La figure 17 résume les résultats concernant les durées de mouvement de cuisse pour les mots dissyllabiques et trisyllabiques. Les médianes et quartiles sont résumés dans le tableau IX.

Les durées de mouvement de cuisse pour les mots dissyllabiques sont significativement augmentées entre la voix projetée et la voix forcée ( $Z=-3.024$ ,  $p=0.002$ ). De même, les durées de mouvement de cuisse pour les mots trisyllabiques sont significativement augmentées entre la voix projetée et la voix forcée ( $Z=0$ ,  $p<0.001$ ).



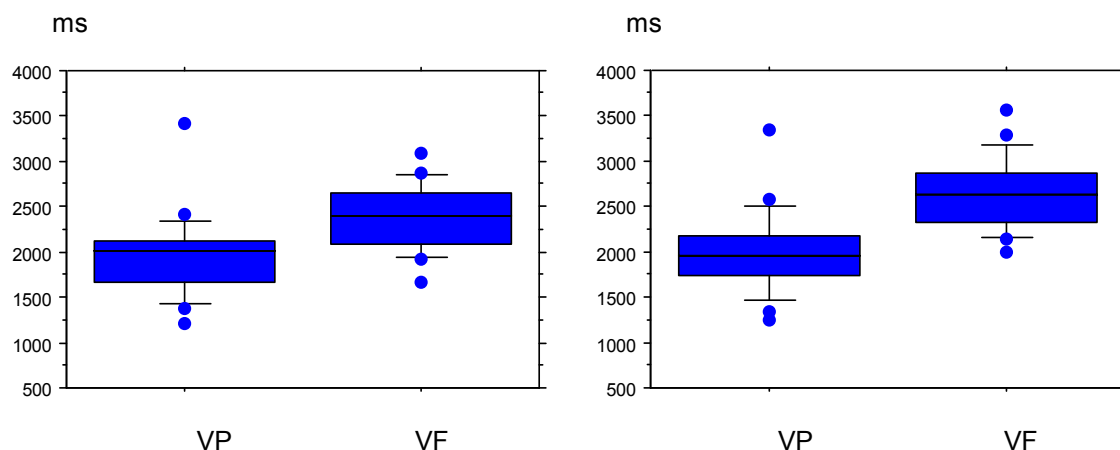


Figure 17 : Médianes et quartiles pour les durées de mouvement de cuisse (en ms) pour les mots dissyllabiques et trisyllabiques en voix projetée (VP) et en voix forcée (VF).

Mots	Voix	25 <sup>ème</sup> percentile	médiane	75 <sup>ème</sup> percentile
Dissyllabiques	VP	1626	2008	2123
	VF	2082	2387	2692
trisyllabiques	VP	1727	1955	2192
	VF	2303	2640	2875

Tableau IX : Statistiques descriptives pour les durées de mouvement de cuisse (en ms) pour les mots dissyllabiques et trisyllabiques en voix projetée (VP) et en voix forcée (VF). (médianes et quartiles)

### Les mouvements de rotation de la tête

La figure 18 résume les résultats concernant les durées de mouvement de rotation de la tête pour les mots dissyllabiques et trisyllabiques. Les médianes et quartiles sont résumés dans le tableau X.

Les durées de mouvement de rotation de la tête pour les mots dissyllabiques sont significativement augmentées entre la voix projetée et la voix forcée ( $Z=-3.32$ ,  $p<0.01$ ). De même, les durées de mouvement de rotation de la tête pour les mots trisyllabiques sont significativement augmentées entre la voix projetée et la voix forcée ( $Z=-3.43$ ,  $p<0.01$ ).

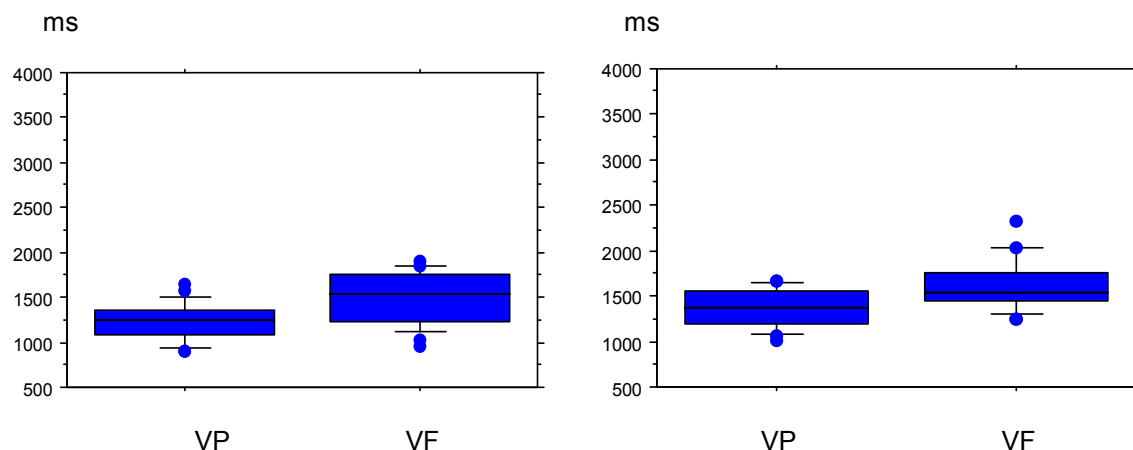


Figure 18 : Médianes et quartiles pour les durées de mouvement de rotation de la tête pour les mots dissyllabiques et trisyllabiques en voix projetée (VP) et en voix forcée (VF).

Mots	Voix	25 <sup>ème</sup> percentile	médiane	75 <sup>ème</sup> percentile
Dissyllabiques	VP	1034	1254	1365
	VF	1234	1535	1781
trisyllabiques	VP	1166	1372	1565
	VF	1450	1544	1764

Tableau X : Statistiques descriptives pour les durées de mouvement de rotation de la tête (en ms) pour les mots dissyllabiques et trisyllabiques en voix projetée (VP) et en voix forcée (VF). (médianes et quartiles)

### 2.3 Etude qualitative du mouvement

Les mouvements de chaque segment (tête, tronc et cuisse) sont étudiés dans le plan sagittal (plan du tangage). Ils sont représentés sous forme de courbes qui varient dans un sens positif lorsque le mouvement se fait vers l'avant, et dans un sens négatif lorsque le mouvement se fait vers l'arrière du sujet. (Figure 3)

De façon globale, le mouvement des sujets en voix projetée se fait par la combinaison d'une extension de la tête sur le tronc (amplitude médiane -8.1 degrés), et des mouvements très faibles du tronc et de la cuisse (amplitudes médianes respectives 0.7 et 0.2 degrés), il en résulte une translation vers l'arrière de la tête. Le mouvement en voix forcée est la combinaison d'une extension de la tête sur le tronc (amplitude médiane -13 degrés), et d'une flexion du tronc sur la cuisse (amplitude médiane 4.3 degrés), et d'un mouvement très faible mais bien individualisé de la cuisse (0.6 degrés dans un sens ou dans l'autre). Ces mouvements sont résumés dans la figure 19.

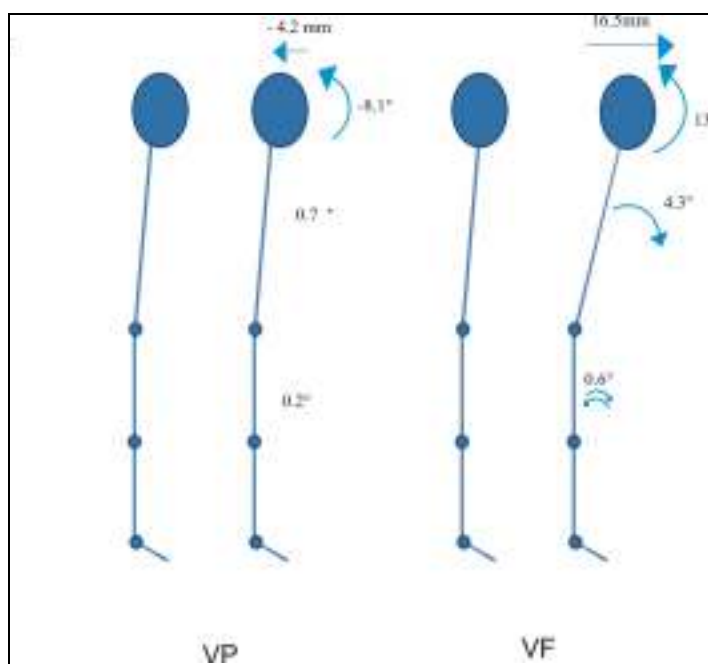


Figure 19 : schéma résumant les mouvements segmentaires des sujets en VP et VF

Plusieurs stratégies posturales peuvent être décrites en fonction du sens des mouvements du tronc et des cuisses (Figure 20). En voix projetée, 13 sujets sur 20 ne présentent pas de mouvement significatif du tronc ( $<1^\circ$ ). Parmi les 7 sujets présentant un mouvement significatif, 4 présentent un mouvement de cuisse de même sens que le tronc et 3 présentent un mouvement de sens contraire.

En voix forcée, seuls les sujets 4 et 20 ne présentent de mouvements significatifs du tronc et des cuisses. Dix sujets présentent des mouvements de cuisse de même sens que celui du tronc, et 8 sujets présentent des mouvements de sens opposés. Dans chacun des groupes, le mouvement de cuisse survient majoritairement après celui du tronc, il s'agit d'un mouvement anticipé pour 3 sujets de chaque groupe.

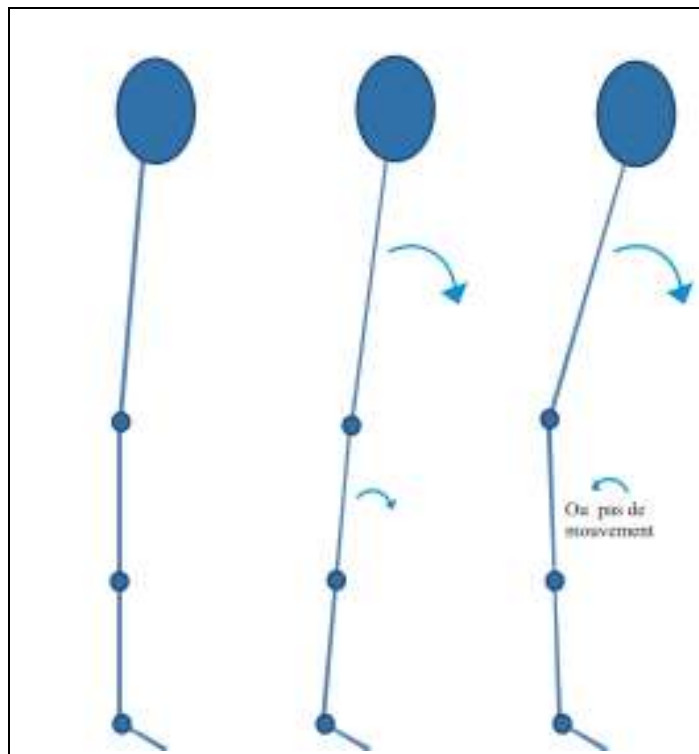


Figure 20 : Schéma des stratégies posturales possibles : à gauche : position de référence, au milieu : mouvements de même sens, à droite : mouvements de sens opposés.

## 2.4 Amplitude des mouvements

### Les mouvements du tronc

La figure 21 résume les résultats concernant l'amplitude des mouvements du tronc. Les médianes et quartiles sont résumés dans le tableau XI. L'amplitude des mouvements du tronc est significativement augmentée entre la voix projetée et la voix forcée ( $Z=-3.92$ ,  $p<0.0001$ ).

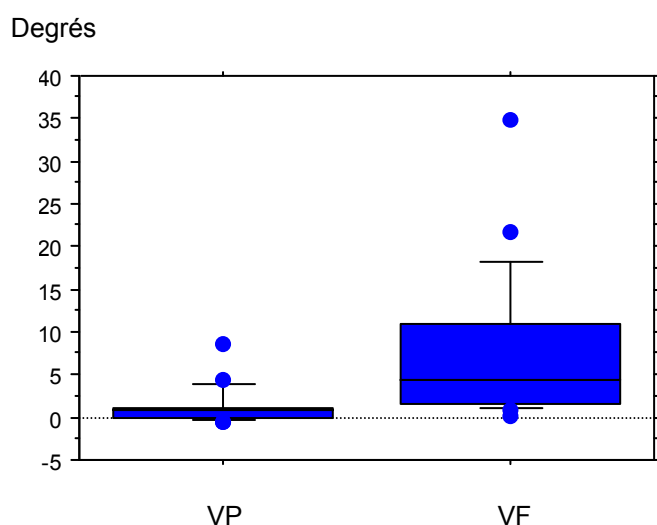


Figure 21 : Médianes et quartiles pour l'amplitude des mouvements du tronc dans les conditions de voix projetée (VP), voix forcée (VF).

	25 <sup>ème</sup> percentile	médiane	75 <sup>ème</sup> percentile
VP	-0.1	0.7	1.2
VF	1.6	4.3	11.1

Tableau XI : statistiques descriptives pour l'amplitude des mouvements du tronc, en voix projetée (VP) et en voix forcée (VF), en degrés. (médianes et quartiles)

## Les mouvements de cuisse

La figure 22 résume les résultats concernant l'amplitude des mouvements de cuisse (valeurs réelles). Les médianes et quartiles (valeurs absolues) sont résumés dans le tableau XII. L'amplitude des mouvements de cuisse est significativement augmentée entre la voix projetée et la voix forcée lorsque l'on choisit la valeur absolue de ces mouvements ( $Z=-2.50$ ,  $p<0.05$ ).

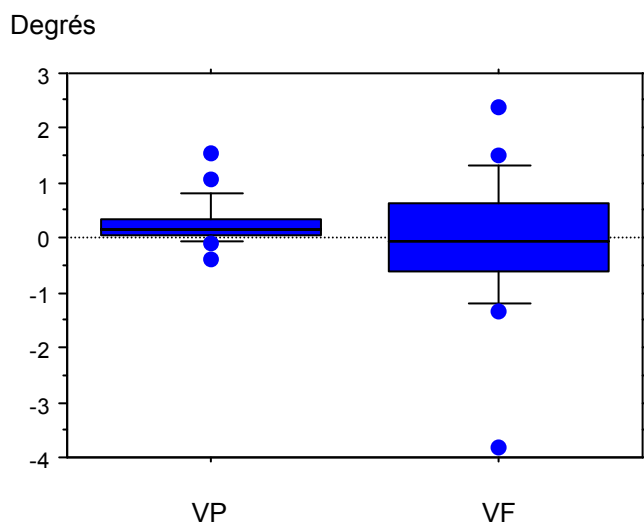


Figure 22 : Médianes et quartiles pour l'amplitude des mouvements de cuisse dans les conditions de voix projetée (VP), voix forcée (VF).

	25 <sup>ème</sup> percentile	médiane	75 <sup>ème</sup> percentile
VP	0.120	0.195	0.373
VF	0.274	-0.596	1.127

Tableau XII : statistiques descriptives pour l'amplitude des mouvements de cuisse en en voix projetée (VP) et en voix forcée (VF), en degrés et en valeurs absolues. (médianes et quartiles)

Les mouvements de rotation (tangage) de la tête

La figure 23 résume les résultats concernant l'amplitude des mouvements de rotation de la tête. Les médianes et quartiles sont résumés dans le tableau XIII. L'amplitude des mouvements de rotation de la tête est significativement augmentée entre la voix projetée et la voix forcée ( $Z=-3.58$ ,  $p<0.001$ ), ce sont des mouvements d'extension (vers l'arrière).

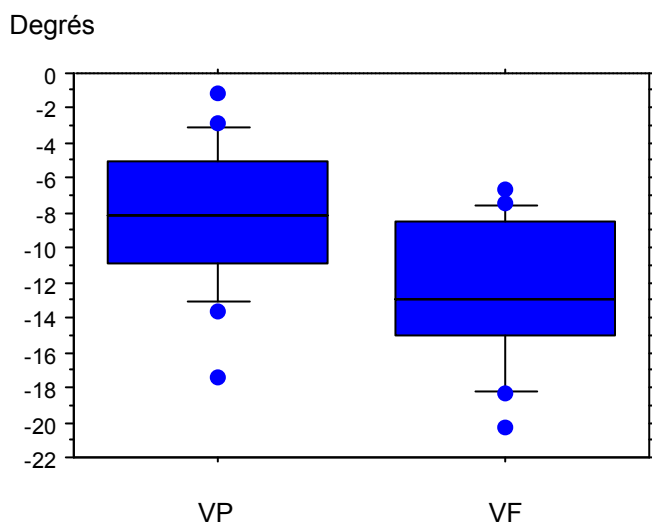


Figure 23 : Médianes et quartiles pour l'amplitude des mouvements de rotation de la tête en voix projetée (VP) et en voix forcée (VF), en degrés.

	25 <sup>ème</sup> percentile	médiane	75 <sup>ème</sup> percentile
VP	-11.3	-8.13	-4.9
VF	-15.1	-13	-8.4

Tableau XIII : statistiques descriptives de l'amplitude des mouvements de rotation de la tête en voix projetée (VP) et en voix forcée (VF), en degrés. (médianes et quartiles)

## Les mouvements de translation de la tête

La figure 24 résume les résultats concernant l'amplitude des mouvements de translation de la tête. Les médianes et quartiles sont résumés dans le tableau XIV. L'amplitude des mouvements de translation de la tête est significativement modifiée entre la voix projetée et la voix forcée ( $Z=-3.88$ ,  $p<0.001$ ).

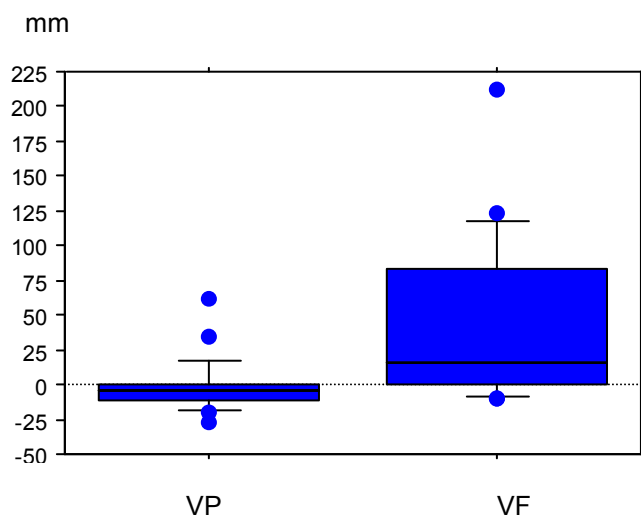


Figure 24 : Médianes et quartiles pour l'amplitude mouvements de translation de la tête dans les conditions de voix projetée (VP), voix forcée (VF), en mm.

	25 <sup>ème</sup> percentile	médiane	75 <sup>ème</sup> percentile
VP	-12	-4.3	-0.6
VF	-0.9	16.5	90.7

Tableau XIV : statistiques descriptives pour l'amplitude mouvements de translation de la tête en voix projetée (VP) et en voix forcée (VF), en mm. (médianes et quartiles)



### 3- Mise en relation de la posture et de la voix

#### 3.1 Mise en relation temporelle des données de la voix et de la posture

##### 3.1.1 Relation entre le début de la voix et le début du mouvement

Les mouvements débutent avant la voix pour tous les segments corporels et toutes les conditions. Les mouvements de tronc et de cuisse sont plus précoces que ceux de rotation de la tête dans les deux conditions (Tableau XV).

Les délais entre le début des mouvements et le début de la voix sont significativement augmentés entre les deux situations pour la rotation de la tête et le mouvement du tronc (Tableau XV).

Voix	Tête	Tronc	Cuisse
VP	313	455	470
VF	424	579	534
Significativité de la différence VP-VF	Z=-3.62 (p<0.001)	Z=-2.39 (p<0.05)	Z=-0.48 (p>0.05)

Tableau XV : Délais médians entre le début de mouvement de chaque segment et le début de la voix (en ms) en voix projetée (VP) et en voix forcée (VF).

### 3.1.2 Relation entre la fin de la voix et la fin du mouvement

L'énoncé finit avant la fin du mouvement pour tous les segments et dans toutes les conditions. (Tableau XVI).

Les délais entre la fin de la voix et celle du mouvement sont significativement augmentés entre les deux situations pour les mouvements du tronc et de cuisse, mais pas pour la rotation de la tête.

Voix	Tête	Tronc	Cuisse
VP	258	524	640
VF	256	806	821
Significativité de la différence VP-VF	Z=-0.86 (p>0.05)	Z=-3.29 (p<0.01)	Z=-2.73 (p<0.05)

Tableau XVI : Délais médians entre la fin de mouvement de chaque segment et le début de la voix (en ms) en voix projetée (VP) et en voix forcée (VF).

### 3.1.3 Rapport de durée de la voix et du mouvement

L'énoncé occupe environ 50 % de la durée du mouvement qui l'accompagne pour le tronc et les cuisses. Il représente 70 à 80% de la durée du mouvement de rotation (tangage) de la tête (tableau XVII, Figure 25). Ce rapport augmente significativement entre les deux conditions pour le mouvement de rotation de la tête (Z=-2.54, p<0.05). Par contre il n'y a pas de modification significative du rapport pour les autres mouvements (tronc : Z=-0.26, p>0.05 ; cuisse : Z=-1.23, p>0.05), qui augmentent donc proportionnellement à l'augmentation de durée de l'énoncé.

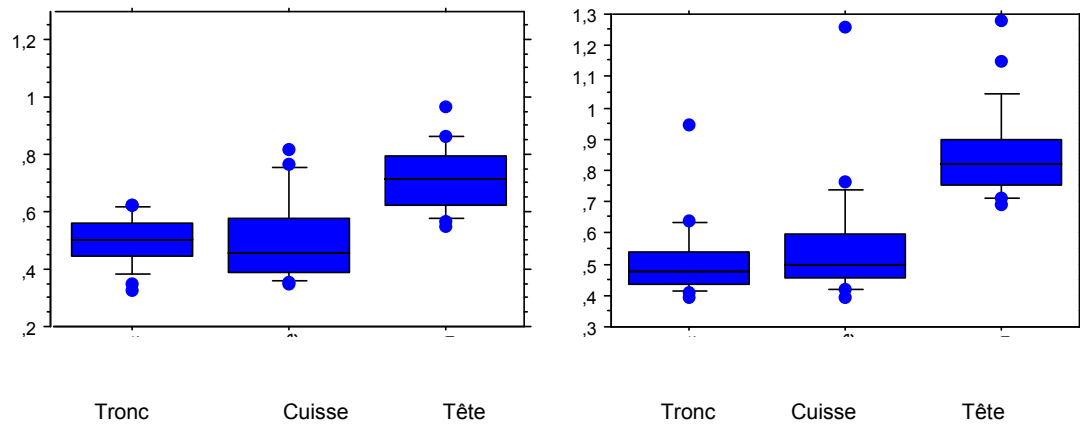


Figure 25 : Distribution des rapports de la durée de la production vocale sur la durée mouvement, en VP (à gauche) et en VF (à droite). (rapports de temps, sans unité)

Segment corporel	VP	VF
Tête	71.3	82.1
Tronc	50.3	47.8
Cuisse	45.7	49.6

Tableau XVII : Médiane du rapport de la durée de l'énoncé sur la durée du mouvement en voix projetée (VP) et en voix forcée (VF), en pourcentages.

D'autre part, le rapport de la durée de l'énoncé sur la durée du mouvement est significativement plus élevé pour le mouvement de rotation de la tête que pour les autres mouvements, qui ne présentent pas de différence significative entre eux. (Tableau XVIII)

		Tête	Tronc	Cuisse
VP	Tête		Z=-3.92 (p<0.0001)	Z=-3.43 (p<0.01)
	Tronc	Z=-3.92 (p<0.0001)		Z=-0.07 (p>0.05)
	Cuisse	Z=-3.43 (p<0.01)	Z=-0.07 (p>0.05)	
VF	Tête		Z=-3.88 (p<0.001)	Z=-3.51 (p<0.001)
	Tronc	Z=-3.88 (p<0.001)		Z=-1.46 (p>0.05)
	Cuisse	Z=-3.51 (p<0.001)	Z=-1.46 (p>0.05)	

Tableau XVIII : Comparaison des rapports de durée d'énoncé sur durée du mouvement en Voix Forcée.

### 3.2 Corrélation de l'amplitude du mouvement à l'intensité moyenne

#### 3.2.1 Corrélation de l'amplitude de mouvement du tronc

L'amplitude du mouvement du tronc est significativement corrélée à l'intensité moyenne pour 17 des 20 sujets (Tableau XIX). Le niveau de cette corrélation est soumis à une grande variabilité interindividuelle (Annexe Résultats 3). Les sujets 4 et 20 présentent des coefficients de corrélation non significatifs, ce qui était attendu puisque leurs mouvements ne sont pas significatifs. Remarquons que pour le sujet 5, alors que l'amplitude n'est pas significativement corrélée à l'intensité moyenne (coefficient de Spearman : 0.36, p>0.05), elle l'est beaucoup plus avec la fréquence fondamentale (coefficient de Spearman : 0.77, Z=3.63, p<0.01). Or ce sujet semble

utiliser sa fréquence fondamentale plutôt que l'intensité pour augmenter son intelligibilité en condition de voix forcée.

	25 <sup>ème</sup> percentile	Médiane	75 <sup>ème</sup> percentile
Tronc	0.56	0.690	0.74
Tête	0.27	0.39	0.67

Tableau XIX : Valeurs du coefficient de corrélation de l'amplitude de mouvement du tronc et de l'amplitude de rotation de la tête avec l'intensité vocale moyenne.

### 3.2.2 Corrélation de l'amplitude du mouvement de la tête

L'amplitude des mouvements de rotation de la tête est également corrélée à l'intensité moyenne mais les coefficients de corrélation, bien qu'également soumis à une grande variabilité interindividuelle, sont plus faibles que pour les mouvements du tronc (Tableau XIX). Concernant le sujet 5, la corrélation prédominante avec la fréquence fondamentale se retrouve (coefficient de Spearman : -0.59 avec la fréquence fondamentale vs -0.34 avec l'intensité moyenne). Les sujets 4, 20, 10 et 13 présentent au contraire une corrélation de l'intensité vocale avec l'amplitude des mouvements de la tête plus importante qu'avec l'amplitude des mouvements du tronc (Annexe Résultats 4).

## **Troisième partie : Discussion**

Cette étude a été construite avec la volonté de créer des conditions expérimentales « écologiques » en mettant le sujet dans une réelle situation de communication. La notion de retour sur l'efficacité de la communication nous a semblé essentielle afin de favoriser l'effort vocal. D'autre part, la liberté de mouvement des sujets était totale, dans l'objectif d'étudier leur posture minimisant les contraintes imposées par l'équipement. Ces éléments font son originalité par rapport aux études précédentes sur l'effet Lombard (voir annexe bibliographique 3)

### **1- Les données de la voix et de la parole**

#### 1.1. Les données de la voix

Nos résultats sont concordants avec les données de la littérature concernant l'effet Lombard : augmentation concomitante de l'intensité vocale, de la fréquence fondamentale et du quotient de fermeture. [Garnier, 2007, Ternström et al. 2006, Södersten et al. 2005, Vilkman et al. 2002, Stathopoulos et Sapienza, 1993, Van Summers et al., 1988, Dejonckere et Pépin, 1983]. La relation entre la fréquence fondamentale et l'intensité vocale est retrouvée [Garnier, 2007, McAllister et Sundberg, 1996]. L'exception représentée par le sujet 5 peut être interprétée par une modulation préférentielle de la F0 lors du passage de la voix projetée à la voix forcée avec un passage du mécanisme laryngé 1 (voix de poitrine) au mécanisme 2 (voix de tête). L'autre explication possible est un comportement « excessif » en voix projetée en termes d'intensité vocale.

L'une des limitations de l'étude a été la perte de données électroglottographiques. Il semble que la plupart des données perdues

correspondaient à des essais où les sujets qui présentaient des mouvements verticaux du larynx importants, ce qui est considéré par de nombreux auteurs comme un indice de forçage vocal [Morrison, 1997, Van Lawrence in Sama et al., 2001]. Ce problème pose la question de la méthode d'analyse du signal EGG. Alors que la technique de détection est robuste vis-à-vis du rapport signal sur bruit, elle est sensible aux mouvements verticaux du larynx. Parallèlement, le signal EGG recueilli au cours de l'expérimentation était de bonne qualité en termes de rapport signal sur bruit. Il semble par conséquent licite d'employer la méthode d'étude de la dérivée du signal EGG pour les études ultérieures concernant l'effort ou le forçage vocal. Cette technique est plus sensible au bruit, mais peu aux mouvements verticaux du larynx, et semble donc adaptée [Henrich et al., 2004].

## 1.2 Les données de la parole

Plusieurs éléments recueillis peuvent être considérés comme des indices de la prosodie : la durée des énoncés, la durée des pauses au sein des énoncés, le coefficient de variation de la fréquence fondamentale (reflet de la mélodie). L'allongement de la durée d'énonciation a été mentionné dans plusieurs études sur l'effort vocal. Les auteurs rapportaient en partie cet allongement à la nécessité d'augmenter l'amplitude des gestes articulatoires, l'autre partie de l'explication était d'ordre comportemental [Van Summers et al., 1988, Bailly, 2005]. C'est ce que nous avons rencontré dans notre étude.

L'augmentation de la dispersion de la fréquence fondamentale a déjà été signalée, [Sodersten et al., 2005, Rothman et al., 2002]. Watson introduit la notion de prosodie lors d'une voix forte produite intentionnellement lors d'une tâche de lecture, en dehors de toute situation interactive et de bruit. Il utilise comme variables reflétant

la prosodie la durée des mots et l'écart-type de la fréquence fondamentale, ces deux paramètres sont augmentés en voix forte [Watson et Hughes, 2006].

A notre connaissance, aucune étude n'a porté sur l'existence et/ou la durée des pauses. L'allongement de durée des pauses et leur introduction dans un nombre croissant d'énoncés différents ont été constatés. Les pauses permettent d'accroître les démarcations entre les phonèmes, ce qui permet d'améliorer l'intelligibilité. Elles ne représentent cependant qu'un faible pourcentage de la durée des énoncés et ne sont pas responsables de leur allongement. La répartition des pauses au sein du corpus, en particulier leur fréquence dans le syntagme 1001, mériterait d'être approfondie quant à l'interprétation en termes de phonétique. De même la localisation des pauses entre les milliers et les centaines est constante, ce qui pourrait s'expliquer sous un aspect linguistique.

L'augmentation de l'ensemble de ces paramètres lorsque l'environnement devient défavorable à la communication peut être interprété comme une stratégie du sujet afin d'améliorer l'intelligibilité de son message. La limite de notre étude est la courte durée des énoncés, cette hypothèse devra être confirmée dans de prochaines études avec des énoncés plus longs.

## **2. Les modifications posturales au cours de l'effort vocal**

### **2.1 Caractérisation des modifications posturales**

Les dispersions angulaires sont plus importantes dans le plan sagittal que dans les autres plans de l'espace pour toutes les conditions pour les mouvements de



la tête, alors que cette prédominance n'est significative que pour la condition VF dans le cas des mouvements du tronc.

L'amplitude des dispersions angulaires est supérieure à 1° dans tous les plans et toutes les conditions au niveau de la tête, alors que pour le tronc, elles ne sont supérieures à 1° que pour la condition VF dans le plan sagittal. Ces données justifient que notre analyse du mouvement associé à la voix se soit concentrée sur les mouvements dans le plan sagittal, qui sont à la fois les plus « intentionnels » et les plus structurés. De même, en condition VN, les mouvements n'étaient pas distinguables du balancement spontané du corps, c'est pourquoi cette condition n'a pas été étudiée par la suite. Par ailleurs, il apparaît que la prédominance des mouvements dans le plan sagittal est conforme aux données de l'étude préliminaire [Giovanni et al., 2006].

Quelles que soient leurs importances, même très faibles, les mouvements sont significativement augmentés dans les trois plans de l'espace lorsque l'effort vocal augmente (condition VF vs VN et VP).

Les mouvements de la tête sont significatifs dans tous les plans alors que les mouvements du tronc sont plus sélectifs à la fois en termes de condition pour les provoquer et en termes de plan de l'espace pour se développer. Ce résultat peut être interprété en termes de masse inertielle mobilisée : la tête est un segment mobile de faible masse par rapport au corps, et l'organe effecteur de la projection de la parole. Les mouvements de la tête ont d'ailleurs fait l'objet d'études qui ont montré l'amélioration de l'intelligibilité par l'existence de ces mouvements, donnant naissance au concept de « prosodie visuelle » [Munhall et al., 2004]. Dans le cadre de ce concept, il sera intéressant d'étudier la place des accents toniques au sein des

énoncés et de tester l'hypothèse de mouvements de tête synchrones de ces accents toniques.

Au contraire, le tronc a une inertie plus grande du fait de la masse corporelle. Les mouvements du tronc sont très faibles lorsque l'effort vocal est peu important, alors que les mouvements de la tête sont déjà significatifs ( $>1^\circ$ ). Les mouvements du tronc sont plus sélectifs que la tête, aussi bien en termes de condition (VF) qu'en termes de sélectivité directionnelle (tangage). Les mouvements du tronc dans les autres plans que le plan sagittal peuvent être considérés comme « parasites », en particulier en ce qui concerne les mouvements dans le plan axial. Ces mouvements pourraient être source d'une dispersion d'énergie qui reste minime chez le sujet sain. Cette hypothèse sera à tester par des études ultérieures chez le sujet présentant une pathologie liée au forçage vocal. Elles pourraient compléter et expliquer les données recueillies par les études sur plateforme de posturographie [Grini et al., 1998].

2.2 La relation étroite entre les caractéristiques de l'énoncé et les accompagnements posturaux.

La relation entre les modifications posturales et la parole concerne à la fois les caractéristiques d'amplitude des mouvements et leurs caractéristiques temporelles.

Les modifications posturales sont beaucoup plus durables que ne l'est la production vocale : la durée de l'énoncé représente environ 50% de la durée du mouvement du tronc et des cuisses, et 70 à 80 % de la durée du mouvement de la tête.

Un allongement de la durée des mouvements est retrouvé pour les mouvements de la tête, du tronc et des cuisses lors du passage de la condition VP à la condition VF. Cet allongement est proportionnel à l'allongement de la durée de

l'énoncé pour le tronc et les cuisses. Pour la tête, cet allongement est moins important que ne l'est l'allongement de l'énoncé. Une limite à cette interprétation est qu'aucune consigne n'était donnée aux sujets pour reprendre la position initiale, afin de ne pas influencer leur posture. La détermination de la fin du mouvement était donc moins précise que celle de son début: il s'agissait du retour à une position stable après la perturbation posturale contemporaine de l'énoncé.

L'amplitude des mouvements de tous les segments est augmentée entre la condition VP et la condition VF. Pour chaque sujet, l'amplitude de mouvement du tronc et de la tête a été mise en corrélation avec l'intensité vocale pour chaque essai. La pente de la droite de tendance est très variable en fonction des sujets mais toujours positive. Cette corrélation est significative pour le tronc et pour la tête chez la plupart des sujets, et elle est significativement plus importante pour le tronc que pour la tête.

Ainsi, les mouvements de la tête semblent moins ordonnés dans l'espace que ceux du tronc, mais semblent plus liés à la production vocale d'un point de vue temporel. Au contraire, les mouvements du tronc sont moins liés à la production vocale d'un point de vue temporel, mais plus liés en termes d'espace. Autrement dit, ils sont plus sélectifs dans leur direction, et leur amplitude est davantage corrélée à l'intensité vocale.

### 2.3 Des perturbations posturales volontaires/contrôle cognitif : l'anticipation du mouvement sur la parole

Le mouvement anticipe toujours le début de la parole, quel que soit le segment corporel étudié. Cette anticipation est de l'ordre de 300 ms (pour la tête en condition VP), à presque 600 ms (pour le tronc en condition VF). Cette anticipation

est plus importante en VF qu'en VP pour le tronc et la tête (différence non significative pour les cuisses). L'anticipation du mouvement sur la voix peut être assimilée à un ajustement postural anticipé (APA). La réalisation d'un mouvement volontaire est anticipée par des ajustements posturaux permettant à la fois le maintien et l'adaptation de l'orientation des différents segments du corps entre eux ou par rapport à la gravité afin de préparer le mouvement. En ce qui concerne le mouvement lié à la production vocale, ce mouvement a clairement un rôle d'accompagnement et d'optimisation de la communication et de ce point de vue il s'agit d'un APA.

Dans notre étude, la modification posturale était très anticipée par rapport au début de la production vocale. Par exemple, le tonus actif du muscle soléaire est inhibé 150 ms avant l'activation des muscles des bras au cours d'une tâche de soulèvement à deux bras [Horak et Nashner, 1986, Zattara et Bouisset, 1981], alors que dans notre étude, ce délai est beaucoup plus important. Deux explications semblent envisageables, et complémentaires.

-La tâche réalisée par le sujet est une action volontaire, mais non motrice contrairement à la plupart des études précédentes sur les APA. Si le temps d'élaboration de la parole est plus long que celui de l'élaboration du mouvement, si le système d'ajustement moteur est mis en route dès le début de cette élaboration cela pourrait expliquer que l'ajustement moteur soit très précoce. Ceci corroborerait l'hypothèse de deux systèmes parallèles commandant d'une part l'action volontaire d'autre part les ajustements posturaux. Cependant, il resterait à mettre cette hypothèse à l'épreuve en la comparant avec des études ciblées impliquant des tâches de praxies complexes.

-Cette anticipation est d'ordre comportemental : le sujet commence à bouger pour attirer l'attention de son auditeur : « attention, je vais te parler, et te dire quelque chose d'assez important pour que je me projette vers toi ». Cette hypothèse rejoint la théorie de F. Le Huche. Mais ce mouvement n'est pas conscient, le sujet ne pense pas qu'il va bouger avant ou pendant qu'il parle.

## 2.4 Les stratégies posturales

Les mouvements en VP et en VF sont qualitativement différents pour l'ensemble des sujets. En condition VP, les mouvements de cuisses et du tronc sont négligeables, le seul mouvement est celui d'extension de la tête, résultant en une translation vers l'arrière de très faible amplitude du front des sujets. En VF, l'extension de la tête est plus ample, les mouvements du tronc sont significatifs vers l'avant, les mouvements de cuisse, bien que minimes, sont plus importants, et dirigés en avant ou en arrière selon les sujets.

Le choix d'un mouvement de cuisse de même sens que celui du tronc (composante principale de cheville) ou de sens nul ou contraire (composante principale de hanche) ne semble pas dicté par l'amplitude du mouvement du tronc.

Le mouvement de cuisses survient après le mouvement de hanche chez la plupart des sujets, en compensation de ce mouvement. Seuls 1/3 des sujets présentent une anticipation du mouvement de cuisse sur celui de la hanche. Or les articles traitant de l'inclinaison volontaire du tronc retrouvent tous soit une anticipation du mouvement de cuisse soit la survenue concomitante des deux mouvements. Ce retard du mouvement de cuisse et sa très faible amplitude pourraient être interprétés comme une légère détérioration de la posture du fait de la

co-existence de l'activité de parole. Il y aurait ainsi une détérioration du schéma habituel d'ajustement postural en faveur de l'activité de communication qui projetterait l'ensemble du corps vers l'auditeur. Il est important toutefois de noter que jamais l'équilibre du sujet n'a été mis en péril au cours des différentes épreuves.

## **Conclusions et perspectives**

L'effort vocal s'accompagne de modifications vocales et prosodiques ayant pour objectif d'améliorer l'intelligibilité du message. L'étude de cet effort ne se conçoit que dans une situation de communication. L'étude réalisée ici a pour particularité de reproduire une mise en situation « écologique », malgré l'équipement du sujet et le lieu de l'expérimentation. En effet, peu d'auteurs ont exploré l'effort vocal sur des sujets en position debout. Cette étude a permis d'étudier précisément les modifications posturales segmentaires au cours de l'effort vocal. Elle a ainsi mis en évidence plusieurs éléments :

- Les modifications posturales ne sont pas des perturbations secondaires à l'effort vocal mais il s'agit de mouvements construits, volontaires et intégrés à la communication, bien que leur élaboration soit sub-consciente.
- Ces modifications sont corrélées à l'importance de l'effort vocal aussi bien en termes d'amplitude du mouvement qu'en termes de durée.
- Toutefois, ces modifications posturales ne sont pas parfaitement superposables au modèle des ajustements posturaux anticipés, en particulier car elles surviennent longtemps avant le début de la parole et parce qu'elles ne reproduisent qu'une partie du schéma d'ajustement postural habituel.

Cette étude fructueuse ouvre de nombreuses voies de recherches à venir :

- Poursuivre l'étude de la parole Lombard du point de vue de la prosodie avec des énoncés plus longs.
- Poursuivre l'étude des modifications posturales contemporaines de l'effort vocal dans d'autres groupes de sujets en particulier les enfants qui sont en cours de

développement postural et oral pour qui les perturbations pourraient être plus importantes.

-Poursuivre l'étude dans un groupe de sujets présentant une pathologie liée au forçage vocal à la recherche de comportements qualitativement ou quantitativement anormaux.

Nous avons ici étudié le retentissement de la production vocale sur la posture. Réciproquement, il serait intéressant d'évaluer le retentissement de la posture sur la voix :

-soit chez le sujet sain soumis à des perturbations posturales volontaires ou involontaires ou en équilibre précaire sur un support étroit par exemple.

-soit en étudiant la production vocale chez des individus présentant des troubles posturaux (enfants scoliotiques par exemple).

D'un point de vue du contrôle postural, il serait intéressant de réaliser une étude sur les modifications posturales au cours de la réalisation d'une praxie complexe mettant en jeu une projection du tronc vers l'avant afin de le comparer aux synergies axiales et aux modifications posturales de l'effort vocal.

Enfin, à visée d'application clinique, il semble que les mouvements du tronc soient les plus spécifiquement liés à l'effort vocal. La validation d'une méthode simple de mesure de ces mouvements et de leur corrélation avec la production vocale pourrait permettre de proposer un bilan ambulatoire du comportement d'effort vocal, ce qui pourrait être utile à la prise en charge du surmenage vocal.



## Références Bibliographiques

- Alexandrov A, Frolov A, Massion J. Axial synergies during human upper trunk bending. *Exp Brain Res*. 1998 Jan;118(2):210-20.
- Alexandrov AV, Frolov AA, Horak FB, Carlson-Kuhta P, Park S. Feedback equilibrium control during human standing. *Biol Cybern*. 2005 Nov;93(5):309-22.
- Alexandrov AV, Frolov AA, Massion J. Biomechanical analysis of movement strategies in human forward trunk bending. I. Modeling. *Biol Cybern*. 2001 Jun;84(6):425-34.
- Alexandrov AV, Frolov AA, Massion J. Biomechanical analysis of movement strategies in human forward trunk bending. II. Experimental study. *Biol Cybern*. 2001 Jun;84(6):435-43.
- André-Thomas A. « *Equilibre et équilibration* ». Paris, Masson, 1940.
- Angsuwarangsee T, Morrison M. Extrinsic laryngeal muscular tension in patients with voice disorders. *J Voice*. 2002 Sep;16(3):333-43.
- Bailly L. Etude articulatoire de la parole produite en environnement bruyant. Mémoire de master 2005, université Paris 6.
- Bruno E, De Padova A, Napolitano B, Marroni P, Batelli R, Ottaviani F, Alessandrini M. Voice Disorders and Posturography: Variables to Define the Success of Rehabilitative Treatment. *J Voice*. 2007 Nov 1.
- Cayreyre F, Akl L, Amy de la Bretèque B, Ouaknine M, Giovanni A. Augmentation des mouvements respiratoires abdominaux lors du passage soudain de la voix conversationnelle à la voix forte. *Rev Laryngol Otol Rhinol (Bord)*. 2005;126(5):347-51.

- Crenna P, Frigo C, Massion J, Pedotti A. Forward and backward axial synergies in man. *Exp Brain Res*. 1987;65(3):538-48.
- Dejonckere PH, Pépin F. Etude de l'effet Lombard par la mesure du niveau sonore équivalent. *Folia Phoniatr (Basel)*. 1983;35(6):310-5.
- Di Cristo A. De la microprosodie à l'intonosyntaxe. Thèse de Doctorat d'Etat ès-Lettres, Université de Provence, Institut de Phonétique, Aix-en-Provence, France, 1978.
- Dikkers FG, Nikkels PG. Benign lesions of the vocal folds: histopathology and phonotrauma. *Ann Otol Rhinol Laryngol*. 1995 Sep;104(9 Pt 1):698-703.
- Ferrigno G, Pedotti A. ELITE: a digital dedicated hardware system for movement analysis via real-time TV signal processing. *IEEE Trans Biomed Eng*. 1985 Nov;32(11):943-50.
- Garnier M. Communiquer en environnement bruyant: de l'adaptation jusqu'au forçage vocal. Thèse de doctorat université Paris 6, spécialité Acoustique-Phonétique, 2007.
- Giovanni A, Akl L, Ouaknine M. Postural dynamics and vocal effort: preliminary experimental analysis. *Folia Phoniatr Logop*. 2008;60(2):80-5
- Giovanni A, Assaiante C, Galmiche A, Vaugoyeau M, Ouaknine M, Le Huche F. Forçage vocal et posture : etudes expérimentales chez le sujet sain. *Rev Laryngol Otol Rhinol (Bord)*. 2006;127(5):285-91
- Giovanni A, Sacre J, Robert D. Forçage vocal. *Encycl med chir ORL*. 2007, 20-752-A-15.
- Grand dictionnaire de psychologie, Paris, Larousse, 1997.

- Grini MN, Ouaknine M, Giovanni A. Modifications posturales et segmentaires contemporaines du forçage vocal. *Rev Laryngol Otol Rhinol (Bord)*. 1998;119(4):253-7.
- Gurfinkel VS, Shik M. *The control of posture and locomotion*. In M Gydkov, N Tankov, D Kosarov (Eds). *Motor control*. New-York, Plenum Press, 1988:217-234.
- Henrich N, d'Alessandro C, Doval B, Castellengo M. On the use of the derivative of electroglottographic signals for characterization of nonpathological phonation. *J Acoust Soc Am*. 2004 Mar;115(3):1321-32.
- Hirano M: *Psycho-acoustic evaluation of voice: GRBAS scale for evaluating the hoarse voice*. *Clinical examination of voice*. Vienne, Springer, 1981.
- Hoit JD. Influence of body position on breathing and its implications for the evaluation and treatment of speech and voice disorders. *J Voice*. 1995 Dec;9(4):341-7
- Holmberg EB, Hillman RE, Perkell JS. Glottal airflow and transglottal air pressure measurements for male and female speakers in soft, normal, and loud voice. *J Acoust Soc Am*. 1988 Aug;84(2):511-29
- Horak FB, Nashner LM. Central programming of postural movements: adaptation to altered support-surface configurations. *J Neurophysiol*. 1986 Jun;55(6):1369-81.
- Huang DZ, Minifie FD, Kasuya H, Lin SX. Measures of vocal function during changes in vocal effort level. *J Voice*. 1995 Dec;9(4):429-38.
- Jeka JJ, Lackner JR. Fingertip contact influences human postural control. *Exp Brain Res*. 1994;100(3):495-502.

- Kerr B, Condon SM, McDonald LA. Cognitive spatial processing and the regulation of posture. *J Exp Psychol Hum Percept Perform.* 1985 Oct;11(5):617-22.
- Kitch JA, Oates J. The perceptual features of vocal fatigue as self-reported by a group of actors and singers. *J Voice.* 1994 Sep;8(3):207-14.
- Latash ML, Hadders-Algra M. What is posture and how is it controlled? In Hadders-Algra M, Brogren Carlberg E (Eds). *Posture: a key issue in developmental disorders.* 2008, Londres: Mac Keith Press. (in press)
- Latash ML, Krishnamoorthy V, Scholz JP, Zatsiorsky VM. Postural synergies and their development. *Neural Plast.* 2005;12(2-3):119-30;
- Le Huche F, Allali A. *La voix, tome 1.* Paris, Masson, 1984.
- Linville SE. Changes in glottal configuration in women after loud talking. *J Voice.* 1995 Mar;9(1):57-65
- Mann EA, McClean MD, Gurevich-Uvena J, Barkmeier J, McKenzie-Garner P, Paffrath J, Patow C. The effects of excessive vocalization on acoustic and videostroboscopic measures of vocal fold condition. *J Voice.* 1999 Jun;13(2):294-302
- Massion J, Amblard B, Assaiante C, Mouchnino L, Vernazza S. Body orientation and control of coordinated movements in microgravity. *Brain Res Brain Res Rev.* 1998 Nov;28(1-2):83-91.
- Massion J, Viallet F. *Posture, coordination et mouvement.* *Rev neurol.* 1990, 146 :536-542.
- Massion J. *Cerveau et motricité.* 1997, Paris : P.U.F.
- Massion J. Movement, posture and equilibrium: interaction and coordination. *Prog Neurobiol.* 1992;38(1):35-56.

- Massion J. *Postural control system*. *Curr Opin Neurobiol*. 1994 Dec;4(6):877-87.
- McAllister A, Sundberg J. Data on subglottal pressure and SPL at varied vocal loudness and pitch in 8- to 11-year-old children. *J Voice*. 1998 Jun;12(2):166-74.
- Mittelstaedt H. Evidence of somatic graviception from new and classical investigations. *Acta Otolaryngol Suppl*. 1995;520 Pt 1:186-7.
- Morgan MD, Triana MA, Milroy TJ. The effect of auditory feedback on phonation threshold pressure measurement. *J Voice*. 2004 Mar;18(1):46-55.
- Morrison M. Pattern recognition in muscle misuse voice disorders: how I do it. *J Voice*. 1997 Mar;11(1):108-14.
- Munhall KG, Jones JA, Callan DE, Kuratate T, Vatikiotis-Bateson E. Visual prosody and speech intelligibility: head movement improves auditory speech perception. *Psychol Sci*. 2004 Feb;15(2):133-7.
- Olivier I, Cuisinier R, Vaugoyeau M, Nougier V, Assaiante C. Dual-task study of cognitive and postural interference in 7-year-olds and adults. *Neuroreport*. 2007 May 28;18(8):817-21.
- Paillard J. *Les déterminants moteurs de l'organisation spatiale*. *Cahiers de psychologie*. 1971, 14 :261-316.
- Paillard J. Motor and representational framing of space. In Paillard J (Ed.), *Brain and space*. Oxford, Oxford University Press, 1991:163-182.
- Pausewang Gelfer M, Andrews ML, Schmidt CP. Effects of prolonged loud reading on selected measures of vocal function in trained and untrained singers. *J Voice*. 1991;5(2):158-167.
- Pettersen V, Bjørkøy K, Torp H, Westgaard RH. Neck and shoulder muscle activity and thorax movement in singing and speaking tasks with variation in vocal loudness and pitch. *J Voice*. 2005 Dec;19(4):623-34.

- Pick HL Jr, Siegel GM, Fox PW, Garber SR, Kearney JK. Inhibiting the Lombard effect. *J Acoust Soc Am*. 1989 Feb;85(2):894-900.
- Rantala L, Vilkmann E. Relationship between subjective voice complaints and acoustic parameters in female teachers' voices. *J Voice*. 1999 Dec;13(4):484-95.
- Rantala L, Vilkmann E, Bloigu R. Voice changes during work: subjective complaints and objective measurements for female primary and secondary schoolteachers. *J Voice*. 2002 Sep; 16(3):344-55.
- Rothenberg M, Mahshie JJ. Monitoring vocal fold abduction through vocal fold contact area. *J Speech Hear Res*. 1988 Sep;31(3):338-51.
- Rothman HB, Brown WS Jr, LaFond JR. Spectral changes due to performance environment in singers, nonsingers, and actors. *J Voice*. 2002 Sep;16(3):323-32.
- Roy N, Bless DM, Heisey D. Personality and voice disorders: a multitrait-multidisorder analysis. *J Voice*. 2000 Dec;14(4):521-48.
- Roy N, Merrill RM, Gray SD, Smith EM. Voice disorders in the general population: prevalence, risk factors, and occupational impact. *Laryngoscope*. 2005 Nov;115(11):1988-95
- Sama A, Carding PN, Price S, Kelly P, Wilson JA. The clinical features of functional dysphonia. *Laryngoscope*. 2001 Mar;111(3):458-63.
- Schulman R. Articulatory dynamics of loud and normal speech. *J Acoust Soc Am*. 1989 Jan;85(1):295-312.
- Södersten M, Granqvist S, Hammarberg B, Szabo A. Vocal behavior and vocal loading factors for preschool teachers at work studied with binaural DAT recordings. *J Voice*. 2002 Sep;16(3):356-71.
- Stathopoulos ET, Sapienza C. Respiratory and laryngeal measures of children during vocal intensity variation. *J Acoust Soc Am*. 1993 Nov;94(5):2531-43.

- Stemple JC, Stanley J, Lee L. Objective measures of voice production in normal subjects following prolonged voice use. *J Voice*. 1995 Jun;9(2):127-33.
- Summers WV, Pisoni DB, Bernacki RH, Pedlow RI, Stokes MA. Effects of noise on speech production: acoustic and perceptual analyses. *J Acoust Soc Am*. 1988 Sep;84(3):917-28.
- Sundberg J, Fahlstedt E, Morell A. Effects on the glottal voice source of vocal loudness variation in untrained female and male voices. *J Acoust Soc Am*. 2005 Feb;117(2):879-85.
- Sundberg J, Leanderson R, von Euler C, Knutsson E. Influence of body posture and lung volume on subglottal pressure control during singing. *J Voice* 1991 Dec;5(4):283-291.
- Ternström S, Bohman M, Södersten M. Loud speech over noise: some spectral attributes, with gender differences. *J Acoust Soc Am*. 2006 Mar;119(3):1648-65.
- Ternström S, Bohman M. Loud speech in realistic environmental noise: phonetogram data, perceptual voice quality, subjective ratings, and gender differences in healthy speakers. *J Voice*. 2005 Mar;19(1):29-46.
- Titze IR. Vocal fatigue: some biomechanical considerations. In Lawrence VL (Ed.). *Transcript of the twelfth symposium: Care of the professional voice. Part One: Scientific papers*. New-York: the voice foundation; 1984:97-104.
- Verdolini K, Titze IR, Fennell A. Dependence of phonatory effort on hydration level. *J Speech Hear Res*. 1994 Oct;37(5):1001-7.
- Vernazza-Martin S, Martin N, Massion J. Kinematic synergies and equilibrium control during trunk movement under loaded and unloaded conditions. *Exp Brain Res*. 1999 Oct;128(4):517-26.

- Vilkmán E, Alku P, Vintturi J. Dynamic extremes of voice in the light of time domain parameters extracted from the amplitude features of glottal flow and its derivative. *Folia Phoniatr Logop.* 2002 May-Jun;54(3):144-57.
- Vilkmán E, Lauri ER, Alku P, Sala E, Sihvo M. Effects of prolonged oral reading on F0, SPL, subglottal pressure and amplitude characteristics of glottal flow waveforms. *J Voice.* 1999 Jun;13(2):303-12.
- Vintturi J, Alku P, Lauri ER, Sala E, Sihvo M, Vilkmán I. Objective analysis of vocal warm-up with special reference to ergonomic factors. *J Voice.* 2001 Mar;15(1):36-53.
- Vintturi J. Studies on voice production with special emphasis on vocal loading, gender, some exposure factors and in intensity regulation. Thèse de l'université d'Helsinki, 2001(b).
- Watson PJ, Hughes D. The relationship of vocal loudness manipulation to prosodic F0 and durational variables in healthy adults. *J Speech Lang Hear Res.* 2006 Jun;49(3):636-44.].
- Welham NV, Maclagan MA. Vocal fatigue: current knowledge and future directions. *J Voice.* 2003 Mar;17(1):21-30.
- Wilson Arboleda BM, Frederick AL. Considerations for maintenance of postural alignment for voice production. *J Voice.* 2008 Jan;22(1):90-9.
- Zattara M, Bouisset S. Chronometric analysis of the posturo-kinetic programming of voluntary movement. *J Mot Behav.* 1986 Jun;18(2):215-23.



## **Annexes**

### **Annexes bibliographiques**

Annexe bibliographique 1 : Données acoustiques et physiologiques au cours de la fatigue vocale

Annexe bibliographique 2 : Modifications anatomiques liées à la fatigue vocale

Annexe bibliographique 3 : Conditions expérimentales des études précédentes sur l'effet Lombard

### **Annexe Matériel et méthodes**

Annexe Matériel et méthodes 1 : Matériel phonétique

### **Annexes résultats**

Annexe résultats 1 : Relation entre intensité et fréquence fondamentale

Annexe résultats 2 : Mots présentant des pauses perceptibles dans chacune des trois conditions pour chaque sujet.

Annexe résultats 3 : Corrélations entre l'amplitude des mouvements du tronc et l'intensité vocale.

Annexe résultats 4 : Corrélations entre l'amplitude des mouvements de la tête et l'intensité vocale.

Auteurs	Population	Tâche	Paramètres acoustiques et physiologiques
Pausewang Gelfer et al., 1991	50 femmes : 26 chanteuses, 24 non expérimentées pour la voix	Lecture à haute voix 1 heure	Modifications significatives chez les sujets non expérimentés : Augmentation de la F0 et de l'intensité Diminution du rapport signal/bruit Au chant : augmentation du Jitter ratio et du shimmer de la 1 <sup>o</sup> note
Stemple et al., 1995	10 femmes saines	Lecture à voix haute, 2 heures	Pas de modification de l'étendue vocale Augmentation de la F0 moyenne Difficulté à produire le son le plus grave en post-tache
Rantala et al., 1999	12 enseignantes	Travail normal, enregistrements pendant les pauses	Deux groupes : Nombreuses plaintes vocales : F0 plus haute, intensité moindre, voix plus stable (faibles jitter et shimmer) en fin de journée que dans le groupe à faibles de plaintes vocales :
Vilkman et al., 1999	40 femmes et 40 hommes	Plusieurs sessions de 45 minutes de lecture à voix haute	Augmentation de la F0 et de l'intensité Augmentation de la pression sous-glottique Augmentation de la valeur du pic négatif du flux glottique dérivé (d) Augmentation de l'amplitude du flux glottique (f)
Rantala et al., 2002	33 enseignantes	Enregistrement du premier et du dernier cours de la journée	Augmentation de la F0 moyenne Notion d'échauffement vocal

Annexe bibliographique 1 : Données acoustiques et physiologiques au cours de la fatigue vocale

Auteur	Population	tâche	Observation en vidéostroboscopie	Significativité des observations	Interprétation physio-pathologique
Linville, 1995	12 sujets sains féminins	15 min lecture haute voix	40% réduction fente glottique, 40 % non modifié 20% augmentation fente glottique	Non significatif	Phase d'échauffement
Stemple et al., 1995	10 sujets sains féminins	2 heures lecture haute voix	8/10 : Fermeture glottique insuffisante, en particulier : fentes glottiques antérieures	Non significatif	Phase de fatigue vocale
Mann et al., 1999	42 sujets sains 37 hommes, 5 femmes	6 jours d'usage intensif de la voix (direction d'exercices de l'armée)	Apparition d'irrégularités du bord des Cordes vocales, d'érythème, d'œdème, diminution de la vibration des CV, diminution de l'amplitude d'excursion des CV (Pas de perturbation du jitter et du shimmer)	Différences significatives	Début de forçage vocal

Annexe bibliographique 2 : Modifications anatomiques liées à la fatigue vocale

Auteur	Conditions	Emission du bruit	Interaction/ communication	Population
De Jonckere et al., 1983	-Assis -Cabine insonorisée	-Casque émetteur -Bruit blanc continu, intensité définie (0,30,50,70,90 dB)	-Non	30 sujets sains féminins 20-26 ans
Van summers et al., 1988	-assis -cabine insonorisée	-Casque émetteur -bruit blanc filtré passe-bas à 3.5KHz, 4 conditions : silence, 80,90 et 100 dB.	-Non -Lecture de mots	2 hommes
Ternstrom et al., 2006	-Assis -Cabine (contrôle du son)	-haut-parleurs -Silence, Bruits blancs (70 dB et 85 dB), bruit de classe d'école maternelle(76 dB), Bruit de discothèque (87 dB),	-Non -Texte adressé à un groupe d'auditeurs imaginaires	23 sujets sains- 12 femmes, 11 hommes
Garnier, 2007	-Assis -Chambre assourdie	-casque ou haut-parleur (2 situations) -bruit blanc et de cocktail de 62 à 86 dB	-jeu interactif, ou dictée (2 situations)	10 sujets sains- 5 femmes, 5 hommes
Morgan et al., 2004	-Chambre de pneumatographie -masque de mesure de pression intra-orale et micro-casque	-casque émetteur -modification de l'intensité du retour de la voix	-Non	14 femmes saines

Annexe bibliographique 3 : conditions expérimentales des études précédentes sur l'effet Lombard.

## Annexe Matériel et Méthodes 1: Matériel phonétique

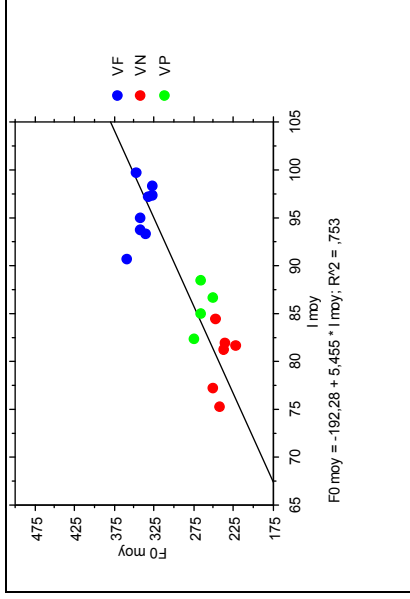
### Voix Normale

Dissyllabiques	19 1001 1008 1020 9000
Trisyllabiques	1018 1019 9002 9009 9020

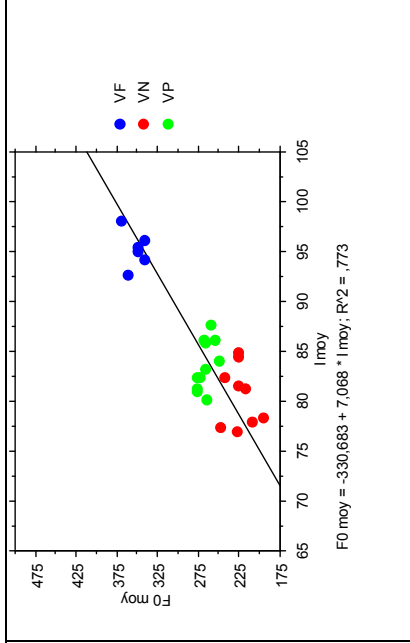
### Voix Projetée et Voix Forte

Dissyllabiques	18 1001 1002 1008 1011 1012 1020 9000
Trisyllabiques	1018 1019 9002 9009 (Deux fois) 9010 9020 (Deux fois)

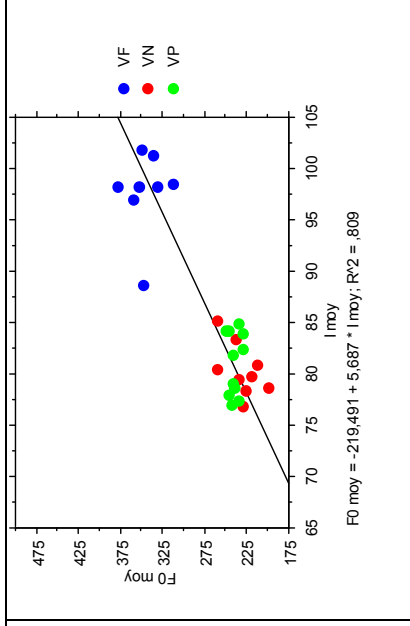
Annexe Résultats 1 : Relation entre Intensité moyenne (en dB) et Fo moyenne (en Hz)



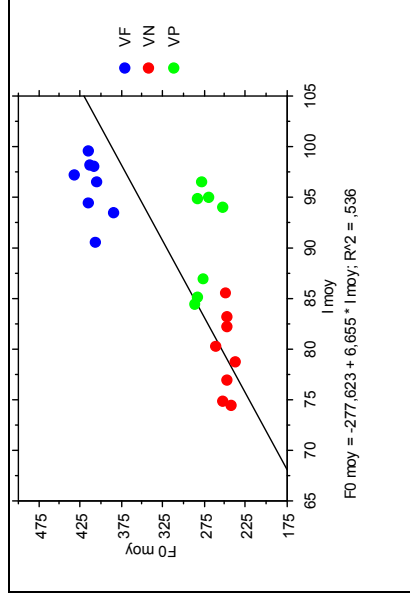
Sujet1, Rho=0.81, Z=3.32, p<0.001



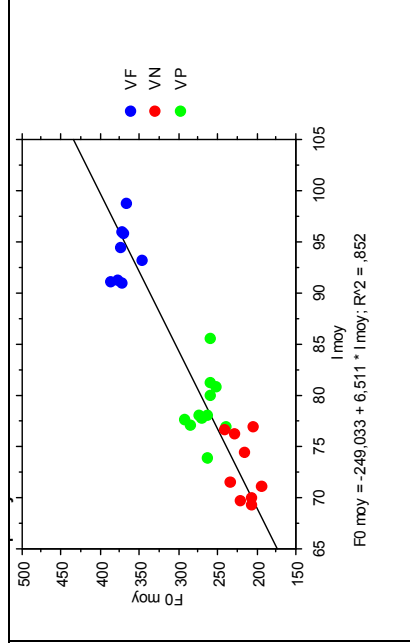
Sujet2, Rho=0.67, Z=3.34, p<0.001



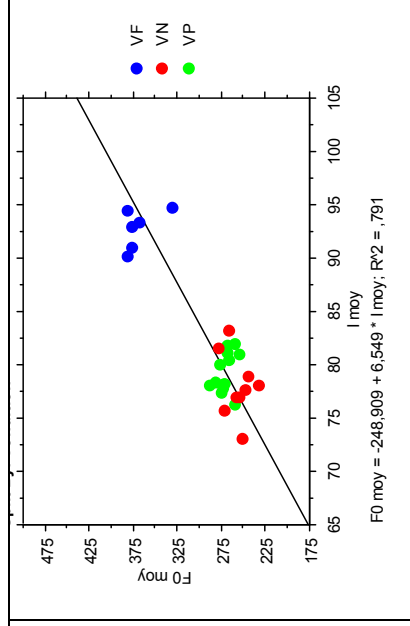
Sujet4 : Rho=0.70, Z=3.66, p<0.001



Sujet5 : Rho=0.79, Z=3.71, p<0.001

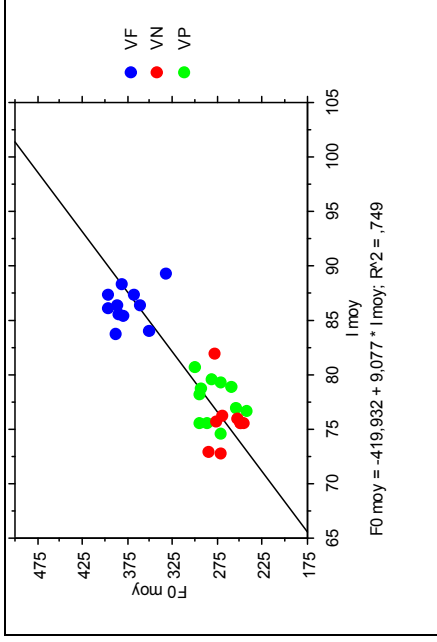


Sujet 8 : Rho=0.83, Z=4.32, p<0.0001

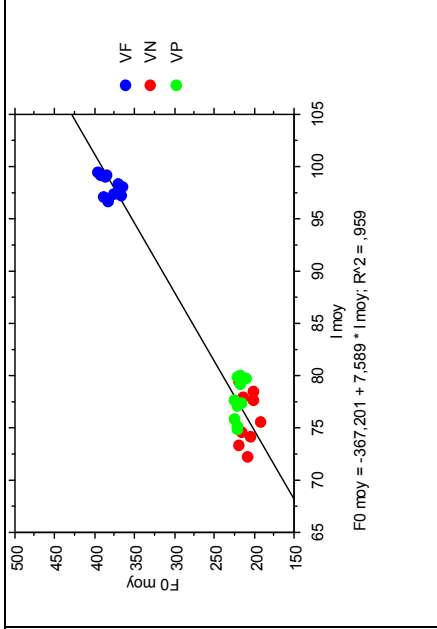


Sujet9 : Rho=0.59, p<0.01

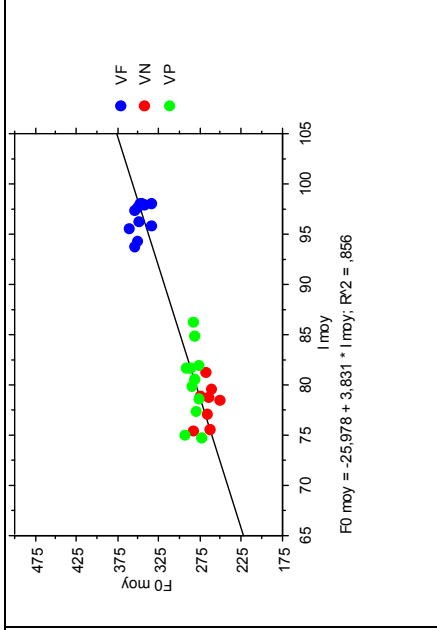
Posture et effort vocal



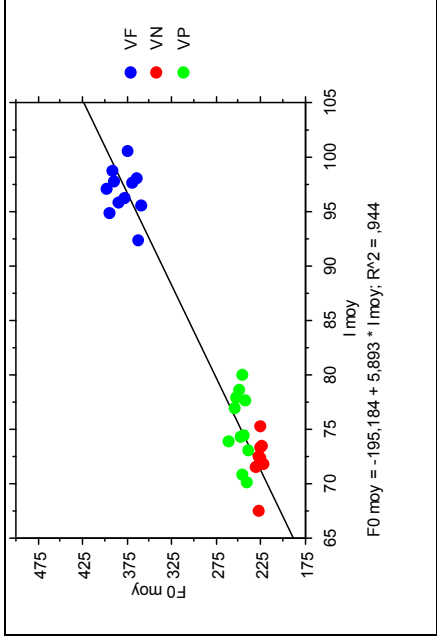
Sujet12 : Rrho=0.73, Z=3.98, p<0.0001



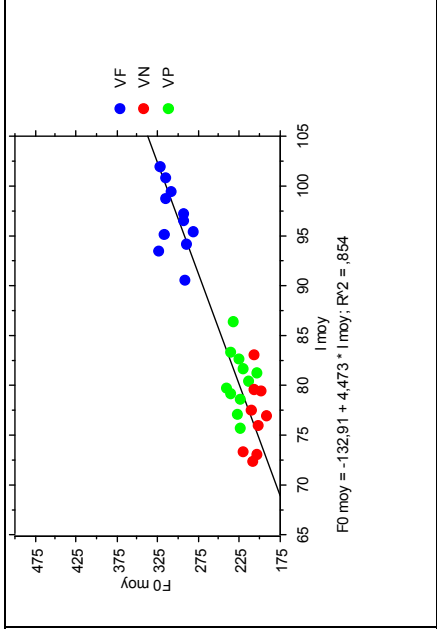
Sujet13 : Rho=0.72, Z=3.82, p<0.001



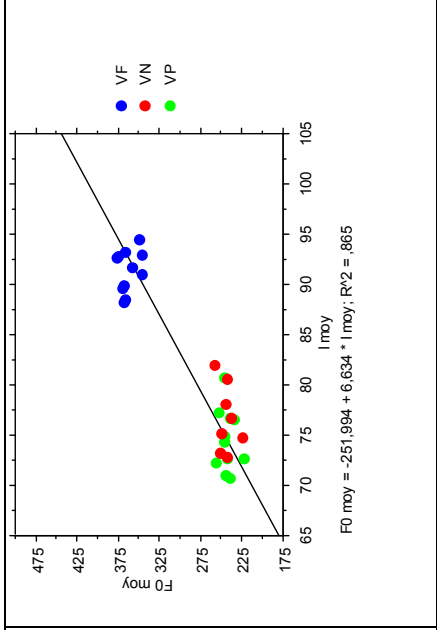
sujet14 : Rho=0.74, Z=3.96, p<0.0001



Sujet15 : Rho=0.83, Z=4.54, p<0.0001

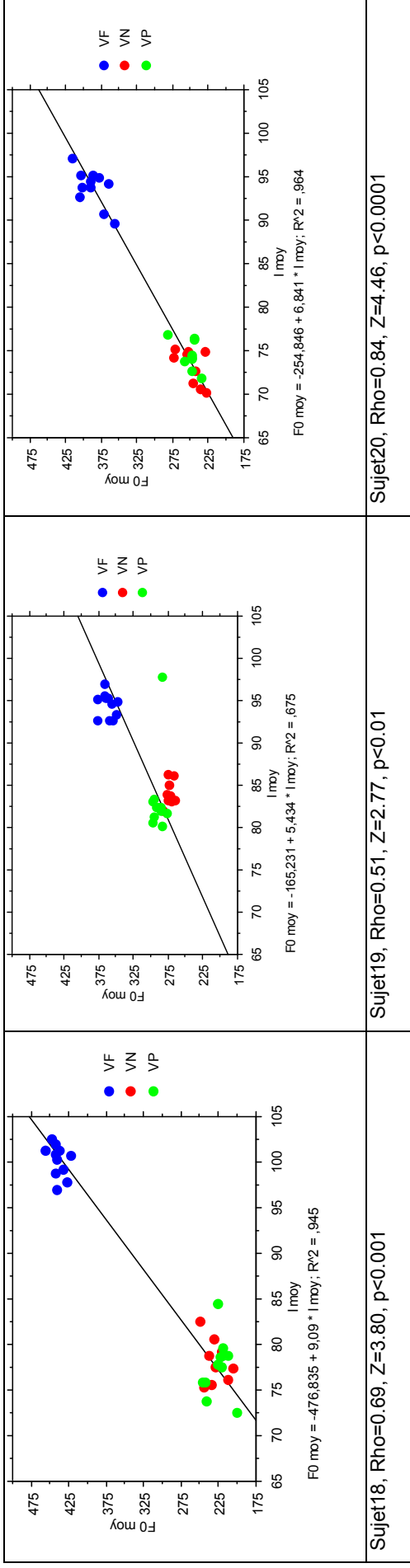


Sujet16, Rho=0.80, Z=4.38, p<0.0001



Sujet17 : Rho=0.74, Z=3.96, p<0.0001

Posture et effort vocal



Remarque : les sujets 3, 6, 7, 10 et 11 n'ont pu être étudiés en raison d'un manque de données électroglottographiques >50%.

Pour les autres sujets, certaines données sont manquantes mais représentent moins de 50% des essais.



Annexe Résultats 2 : Mots présentant des pauses perceptibles dans chacune des 3 conditions pour chaque sujet

Sujet		Mots dissyllabiques	Mots trisyllabiques
1	VN	1001	
	VP	1001, 1011	
	VF	1001, 1002, 1011, 1012	1019, 9002, 9010, 9020
2	VN	1001	
	VP	1001, 1011	
	VF	1002, 1011	1018, 1019
3	VN	1001	1018, 1019
	VP	1001, 1002, 1011, 1012	1018, 1019
	VF	1001, 1002, 1011, 1012	1018, 1019, 9002, 9010
4	VN	1001	
	VP	1001, 1011	
	VF	1001	
5	VN	1001	
	VP	1002, 1011, 1012	9009
	VF	1001, 1002, 1008, 1011, 1012	1018, 1019, 9002, 9010, 9020
6	VN	1001	
	VP	1001, 1011, 1012, 1020	1019
	VF	1001, 1002, 1011, 1012, 1020	1018, 9002, 9010, 9020
7	VN	1001, 1008, 1020	
	VP	1001, 1008, 1011, 1012, 1020	1018, 9002
	VF	1001, 1002, 1008, 1011, 1020	1018, 1019, 9002, 9009, 9010, 9020
8	VN	-	
	VP	1001, 1011	
	VF	-	

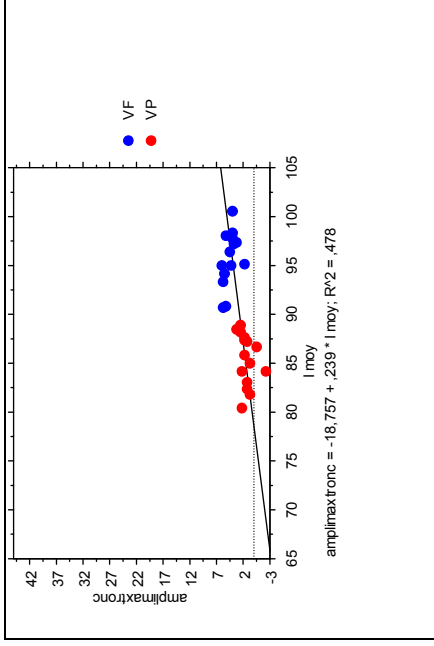
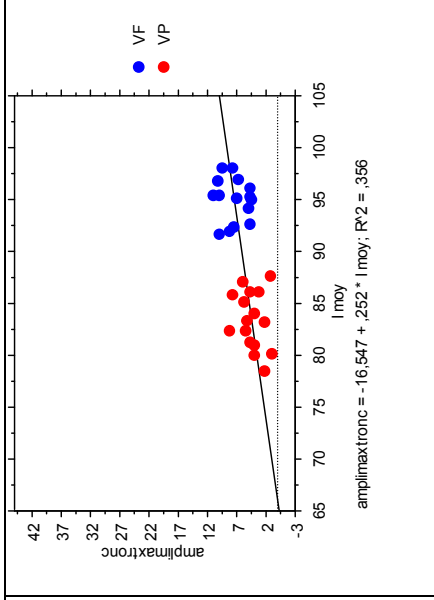
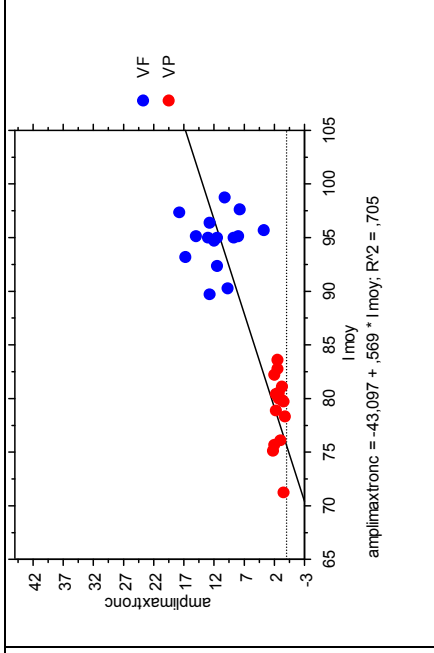
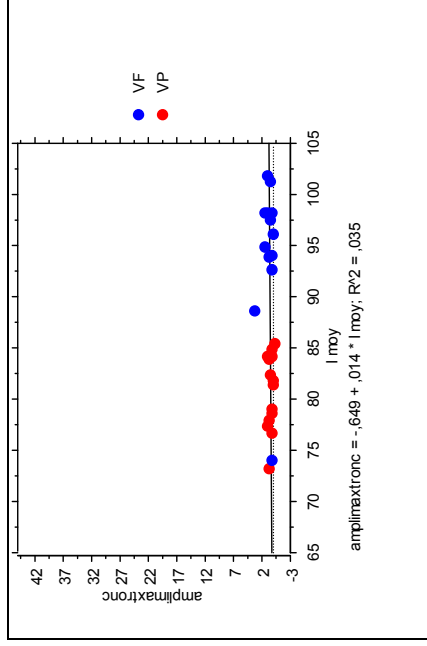
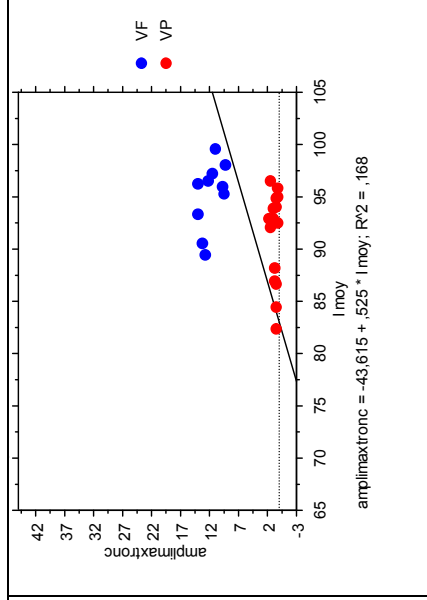
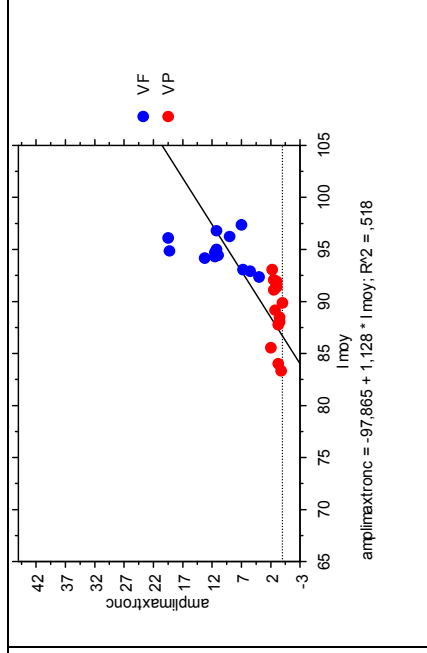
*Posture et effort vocal*

9	VN	1001	
	VP	1001, 1011	
	VF	1001, 1002, 1011, 1020	1018, 9002
10	VN	1001	
	VP	1001, 1008, 1011, 1012, 1020	1018, 9010
	VF	1001, 1008, 1011, 1012, 1020	1018, 9002, 9010, 9020
11	VN	1001, 1008, 1020	
	VP	1001, 1011	1018, 9020
	VF	1001, 1002, 1011, 1012, 1020	1018, 1019, 9002, 9009, 9010, 9020
12	VN	1001	1018, 1019, 9020
	VP	1001, 1008, 1011, 1012, 1020	1018, 1019, 9002, 9009, 9010, 9020
	VF	1001, 1002, 1008, 1011, 1012, 1020	1018, 1019, 9002, 9010, 9020
13	VN	1001	
	VP	1001, 1011	
	VF	1001, 1002, 1011, 1012	1018, 1019, 9002
14	VN	1001	
	VP	1001, 1011	
	VF	1001, 1002, 1012, 1020, 9000	9002, 9010
15	VN	1001	
	VP	1001, 9000	
	VF	1001, 1002, 1012, 1020	1018, 1019, 9020
16	VN	1001	
	VP	1001, 1002, 9000	
	VF	1008, 1011, 1012	
17	VN	1001	9020
	VP	1001, 1002, 1011, 1012	9010
	VF	1001, 1002, 1011, 1012	1018, 1019, 9002, 9010
18	VN	1001	
	VP	1001, 1011	

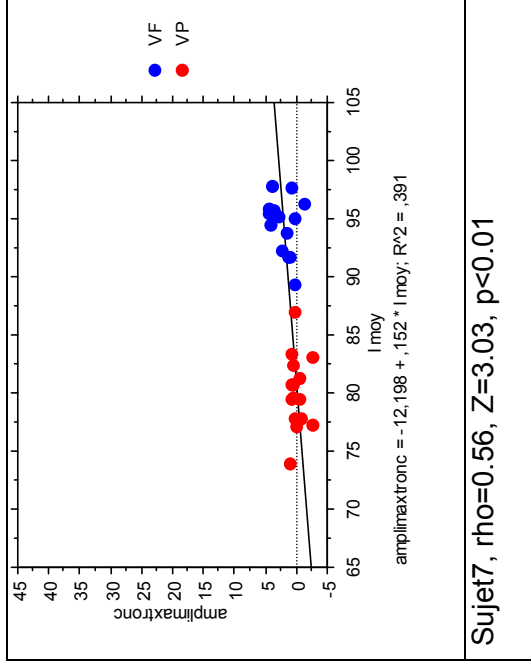
*Posture et effort vocal*

	VF	1002, 1011, 1012	1019, 9002, 9010
19	VN	1001, 1020	1018
	VP	1001, 1002, 1011, 1012, 1020,	1018, 1019, 9002, 9009, 9010, 9020
	VF	1001, 1002, 1011, 1012, 1020, 9000	1018, 1019, 9002 , 9010, 9020
20	VN	-	
	VP	1001, 1011	
	VF	1001, 1011, 1012	1018, 9002,9009, 9010

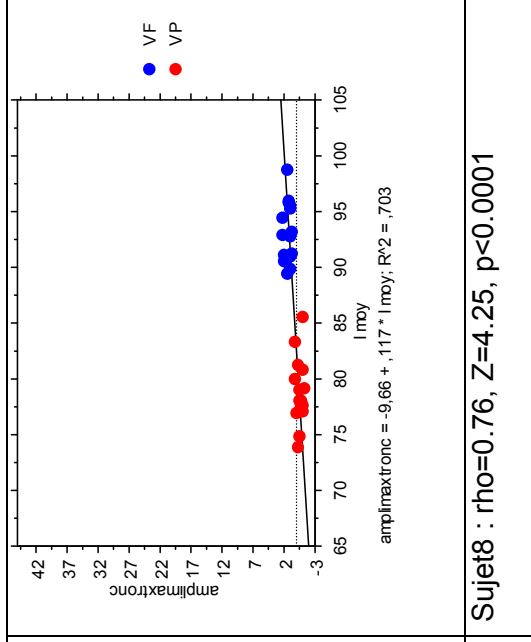
Annexe Résultats 3: Corrélations entre l'amplitude des mouvements du tronc (en degrés) et l'intensité vocale (en dB)

 <p>amplimaxtronic = -18,757 + ,239 * I moy; R<sup>2</sup> = ,478</p>	 <p>amplimaxtronic = -16,547 + ,252 * I moy; R<sup>2</sup> = ,356</p>	 <p>amplimaxtronic = -43,097 + ,569 * I moy; R<sup>2</sup> = ,705</p>
<p>sujet1, Rho=0.72, Z=3.79, p&lt;0.001</p>	<p>sujet2, Rho=0.57, Z=3.12, p&lt;0.05</p>	<p>Sujet3, Rho=0.74, Z=4, p&lt;0.0001</p>
 <p>amplimaxtronic = - ,649 + ,014 * I moy; R<sup>2</sup> = ,035</p>	 <p>amplimaxtronic = -43,615 + ,525 * I moy; R<sup>2</sup> = ,168</p>	 <p>amplimaxtronic = -97,865 + 1,128 * I moy; R<sup>2</sup> = ,518</p>
<p>Sujet4, Rho=0.17, Z=0.86, p&gt;0.05</p>	<p>Sujet5 : Rho=0.36, Z=1.75, p&gt;0.05</p>	<p>Sujet6, Rho=0.85, p&lt;0.0001</p>

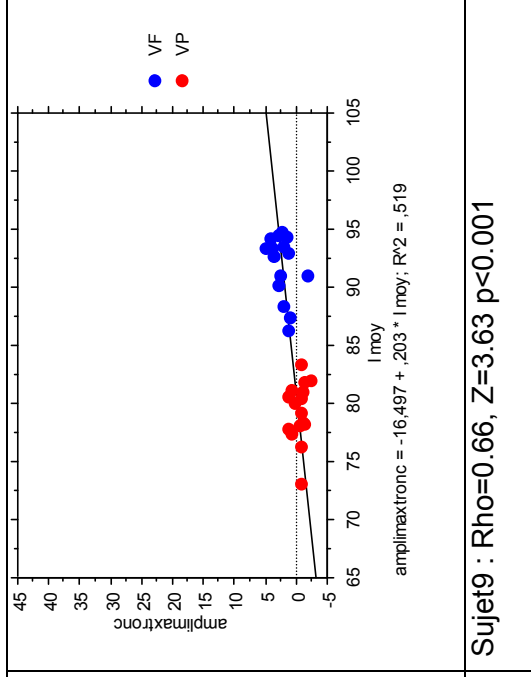
Posture et effort vocal



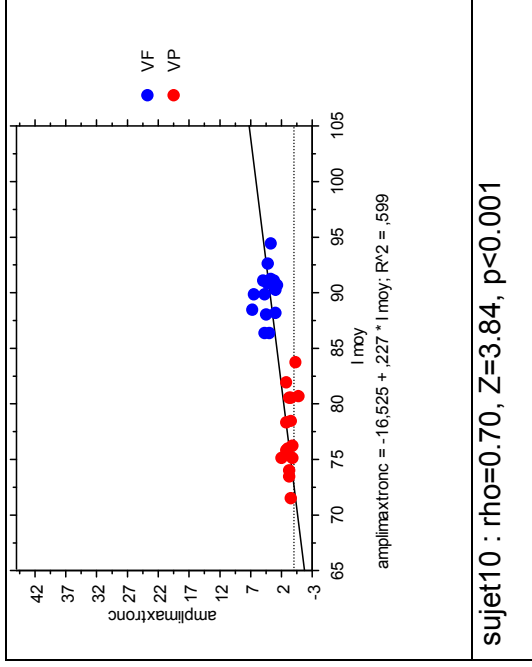
Sujet7, rho=0.56, Z=3.03, p<0.01



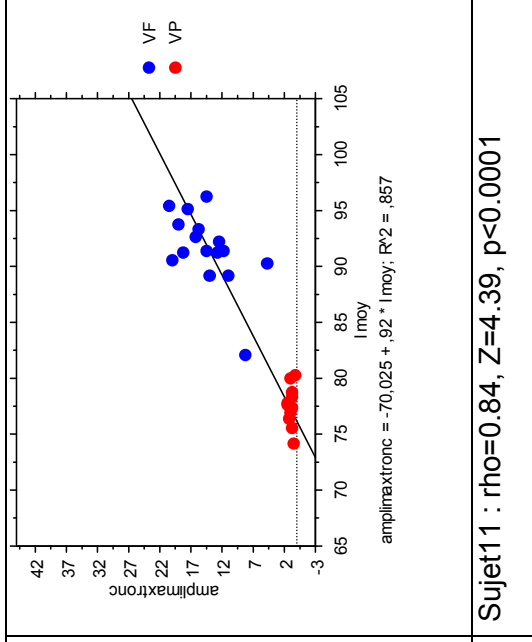
Sujet8 : rho=0.76, Z=4.25, p<0.0001



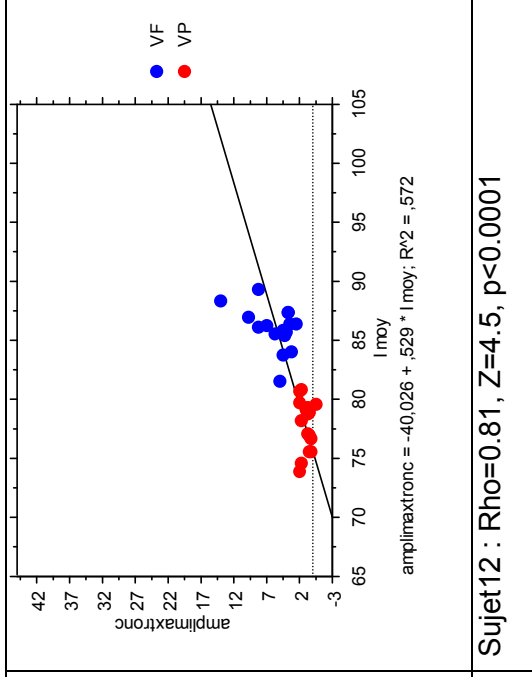
Sujet9 : Rho=0.66, Z=3.63 p<0.001



sujet10 : rho=0.70, Z=3.84, p<0.001



Sujet11 : rho=0.84, Z=4.39, p<0.0001

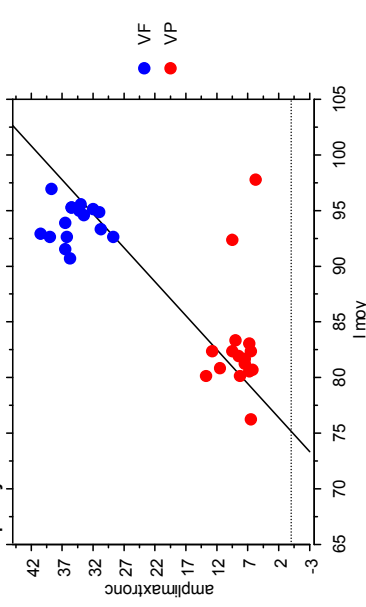
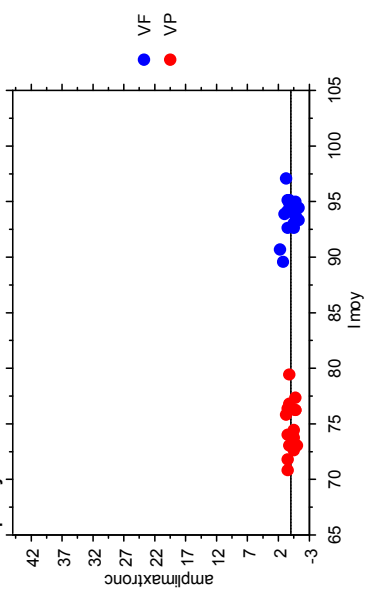


Sujet12 : Rho=0.81, Z=4.5, p<0.0001

Posture et effort vocal

<p>Bivariate Scattergram with Regression Split By: voix</p> <p>amplimaxtronc = -6,376 + ,081 * l moy; R<sup>2</sup> = ,357</p>	<p>Bivariate Scattergram with Regression Split By: voix</p> <p>amplimaxtronc = -3,126 + ,048 * l moy; R<sup>2</sup> = ,28</p>	<p>Bivariate Scattergram with Regression Split By: voix</p> <p>amplimaxtronc = -11,204 + ,148 * l moy; R<sup>2</sup> = ,482</p>			
<p>Bivariate Scattergram with Regression Split By: voix</p> <p>amplimaxtronc = -13,496 + ,185 * l moy; R<sup>2</sup> = ,408</p>	<p>Bivariate Scattergram with Regression Split By: voix</p> <p>amplimaxtronc = -6,598 + ,09 * l moy; R<sup>2</sup> = ,512</p>	<p>Bivariate Scattergram with Regression Split By: voix</p> <p>amplimaxtronc = -59,36 + ,811 * l moy; R<sup>2</sup> = ,855</p>			
<p>Sujet13, Rho=0.59, Z=3.21, p&lt;0.01</p>	<p>Sujet16, rho=0.68, Z=3.78, p&lt;0.001</p>	<p>sujet14 : rho=0.55, Z=3.08, p&lt;0.01</p>	<p>Sujet17, Rho=0.72, Z=3.89 ; p&lt;0.0001</p>	<p>sujet15, Rho=0.74, Z=4.04, p&lt;0.0001</p>	<p>Sujet18 : Rho=0.70, Z=3.92, p&lt;0.0001</p>

Posture et effort vocal

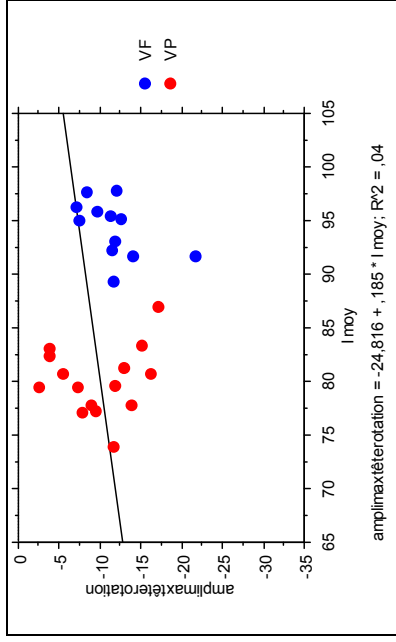
<p>Bivariate Scattergram with Regression Split By: voix</p>  <p>amplimaxtronc = -122,732 + 1,634 * I moy; R<sup>2</sup> = ,644</p>	<p>Bivariate Scattergram with Regression Split By: voix</p>  <p>amplimaxtronc = -,419 + ,005 * I moy; R<sup>2</sup> = ,004</p>
<p>Sujet19, Rho=0.58, Z=3.21, p&lt;0.01</p>	<p>Sujet20, Rho=0.03, Z=0.15, p&gt;0.05</p>

Annexe Résultats 4: Corrélation entre l'amplitude de mouvement de la tête (en degrés) et l'intensité vocale (en dB)

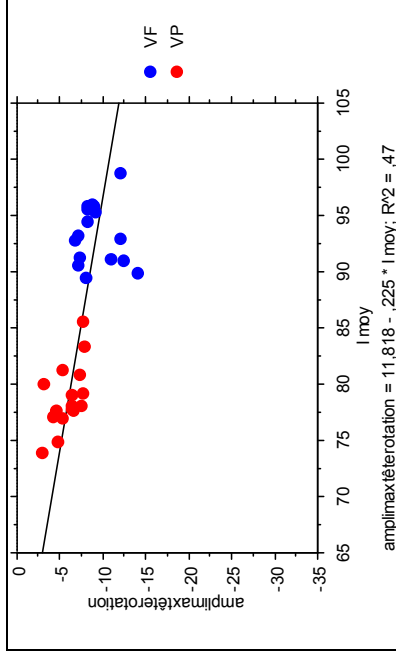
<p>amplimaxtéroration = 23,723 - ,394 * I moy; R<sup>2</sup> = ,18</p>	<p>amplimaxtéroration = - ,3,026 - ,056 * I moy; R<sup>2</sup> = ,026</p>	<p>amplimaxtéroration = 10,083 - ,26 * I moy; R<sup>2</sup> = ,131</p>
<p>sujet1, Rho=-0.40, Z=-2.11, p&lt;0.05</p>	<p>Sujet2, Rho=-0.99, Z=-18, p&gt;0.05</p>	<p>Sujet3, Rho=-0.36, Z=-1.96, p&lt;0.05</p>
<p>amplimaxtéroration = 5,488 - ,136 * I moy; R<sup>2</sup> = ,161</p>	<p>amplimaxtéroration = 24,925 - ,321 * I moy; R<sup>2</sup> = ,068</p>	<p>amplimaxtéroration = 54,983 - ,762 * I moy; R<sup>2</sup> = ,292</p>
<p>Sujet4, Rho=0.39, Z=2.88, p&lt;0.05</p>	<p>Sujet5, Rho=-0.34, Z=-1.69, p&gt;0.05</p>	<p>Sujet6, Rho=0.64, Z=3.2441, p&lt;0.01</p>



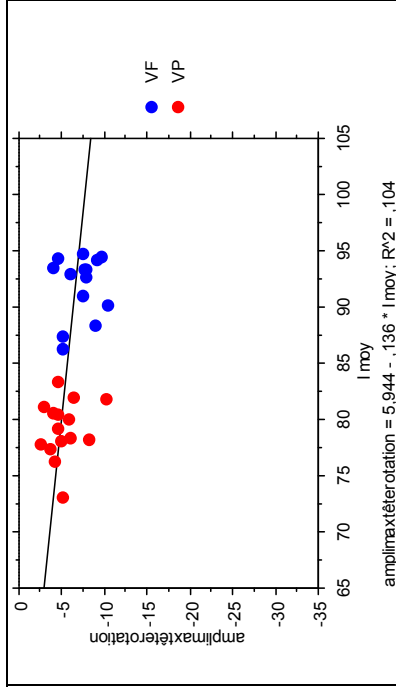
Posture et effort vocal



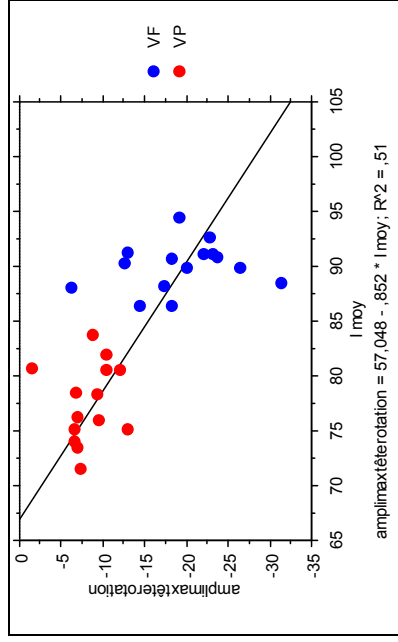
Sujet 7, rho=0.11, Z=0.59, p>0.05



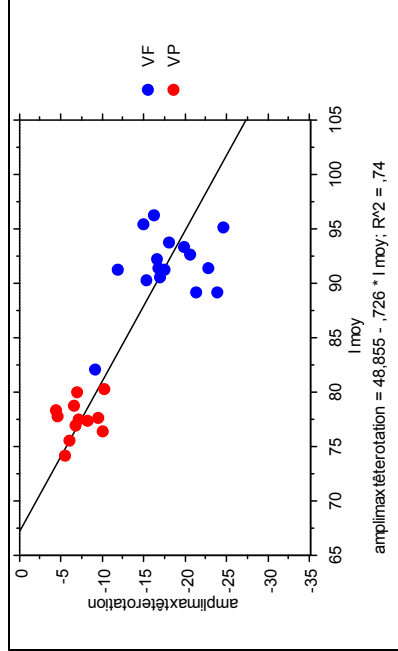
sujet8, Rho=-0.77, Z=-4.29, p<0.0001



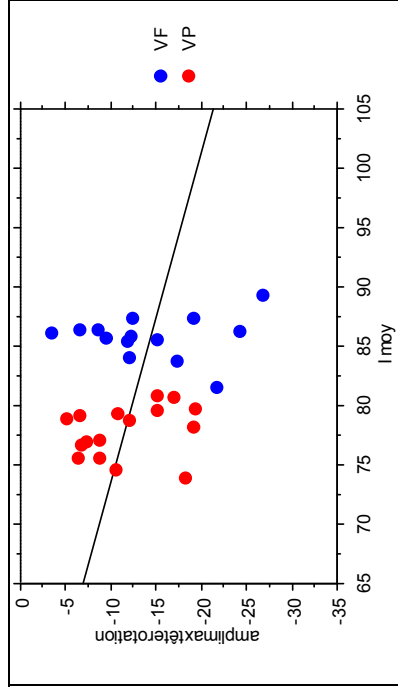
Sujet9 : rho=-0.41, Z=-2.24, p<0.05



Sujet10 : rho=-0.75, Z=-4.02, p<0.0001

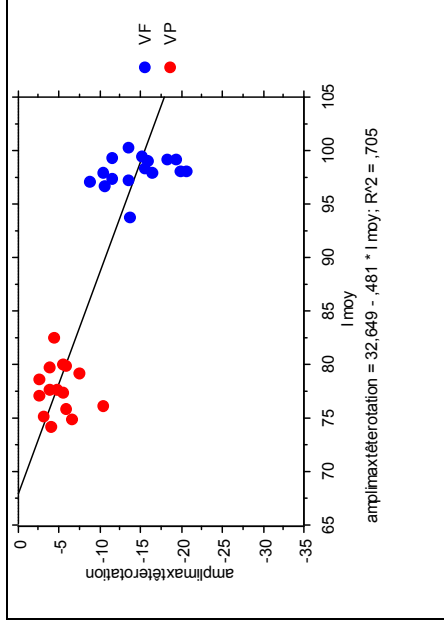


sujet 11 : Rho=-0.75, z=-3.90, p<0.0001

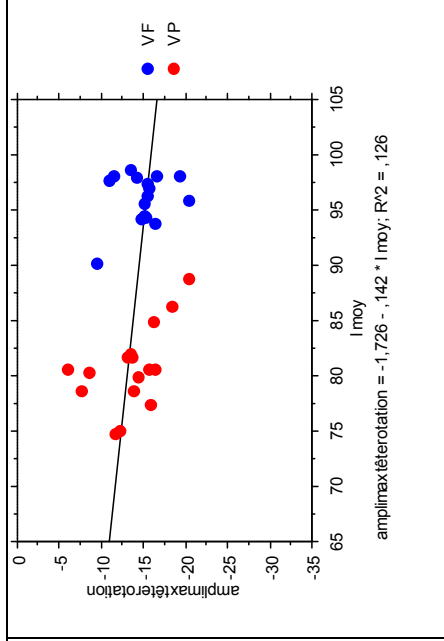


sujet12 : rho=-0.27, Z=-1.48, P>0.05

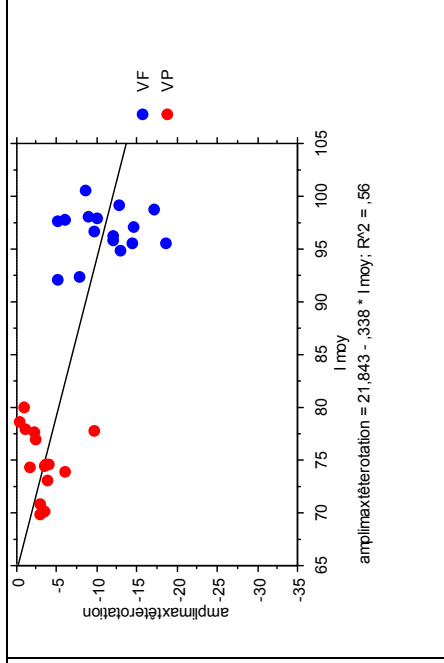
Posture et effort vocal



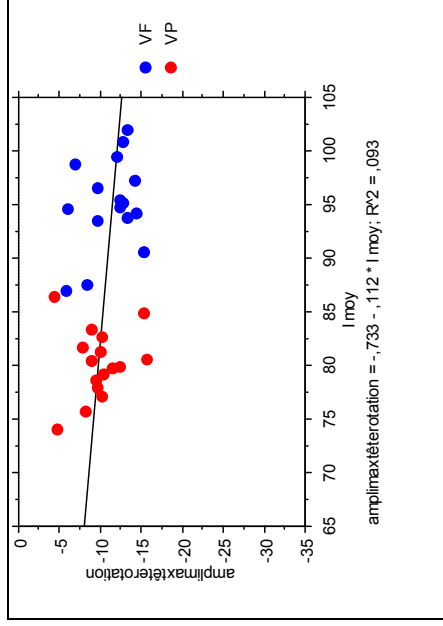
sujet13 : Rho=-0.77, Z=-4.27, p<0.0001



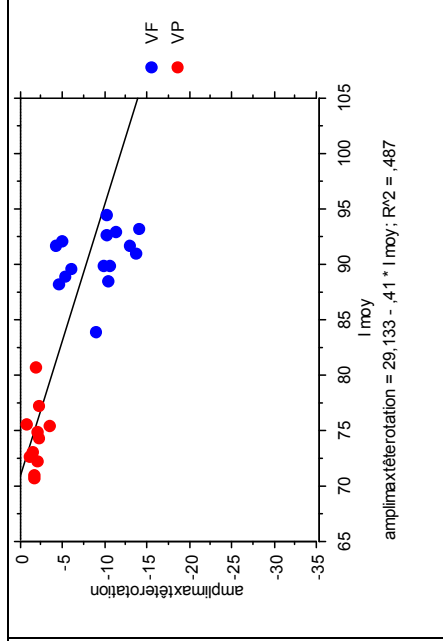
sujet14 : rho=-0.27, Z=-1.53, p>0.05



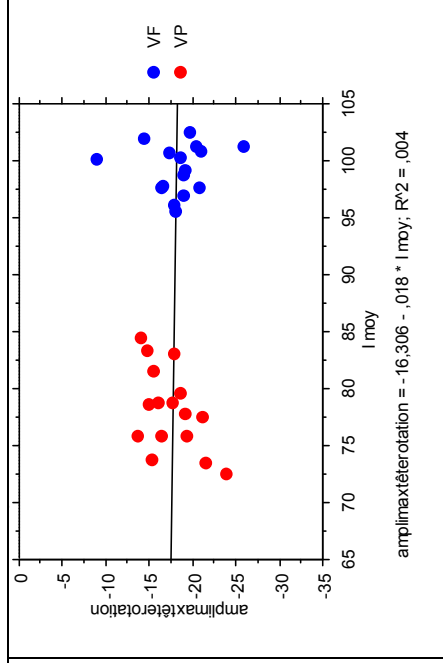
Sujet15, Rho=-0.66, Z=-3.62, p=0.001



Sujet16 : rho=-0.30, Z=-1.65 p>0.05

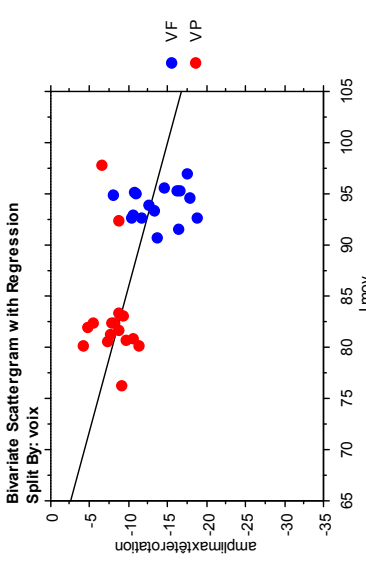
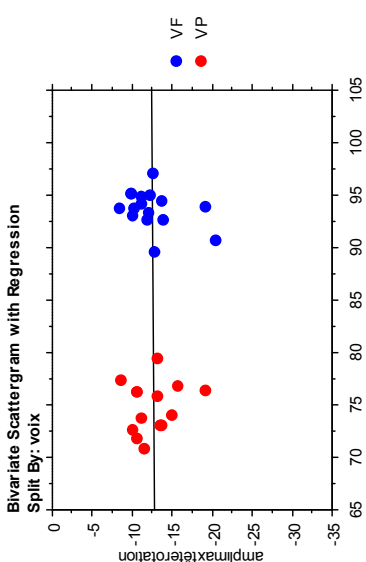


sujet17 : Rho=-0.67, Z=-3.63, p<0.001



Sujet18 : Rho=-0.08, Z=-0.44, p>0.05

*Posture et effort vocal*

<p>Bivariate Scattergram with Regression Split By: voix</p>  <p>amplitude de rotation maximale = 20,185 - ,351 * I moy; R<sup>2</sup> = ,361</p>	<p>Bivariate Scattergram with Regression Split By: voix</p>  <p>amplitude de rotation maximale = -13,42 + ,011 * I moy; R<sup>2</sup> = ,001</p>
<p><b>Sujet19, Rho=-0.52, z=-2.88, p&lt;0.05</b></p>	<p><b>Sujet20, Rho=0.12, Z=0.67, p&gt;0.05</b></p>